日本建築学会　非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会
報告書

天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン

2013 年 3 月 4 日版

日本建築学会

非構造材の安全性評価及び落下事故防止
に関する特別調査委員会

天井等の非構造材の落下事故防止ガイドライン　目次

日本建築学会

非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会　報告書

執筆担当：50音順

猪飼　富雄　3.2.4、3.2.5、5.4
井田　卓造　3.2.1、3.3.2、3.4.1、5.1、5.5
小澤　雄樹（幹事）　付録
太田　博文　3.1.3、4.1.4
川口　健一（主査）　1、2、3、4、5、付録
小早川　規　3.1.4、4、4.1.1、4.1.2、4.1.3
櫻庭　記彦　3.2.3
清家　剛　3.2.5、5.4
多賀　洋　2.3、3.3、3.3.1、5.2、5.3
早川　文雄　2.4、3.4、3.4.2、3.4.3
元結正次郎（幹事）　3.2.2

第 1 章　序

1.1　はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、非構造材の落下、特に夥しい件数の吊り天井の落下事故が広域にわたって発生、多くの人命を奪い傷つける結果となった。これを受け、本会 和田 章 会長の特命により「非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会」が発足、非構造材落下事故の防止と解消を目指して本会からの本質的かつ有意義な発信を行うべく、短期集中型の活動を行ってきた。本報告は、この特別調査委員会が１年半余りにわたって行ってきた調査研究活動の最終報告書である。

天井を始めとする非構造材の落下事故の問題点は下記のように様々な観点から列挙することができる。

１．構造躯体はほとんど損傷がないのに、内部空間で多くの人命が危険に曝される。
２．地震時だけでなく平時にも頻発しており、単なる耐震補強では防止・解消できない。
３．建築空間の機能が長期間にわたって損なわれるため、社会的重要機能や事業継続性へ与える影響が大きい。
４．高所設置の天井材の安全性および危険性を判断する適切な評価法がない。
５．既存天井の落下防止対策の考え方と具体例が乏しい。
６．音響天井のように重量天井が必要な場合の安全性確保の方法が提示されていない。
７．落下事故発生後の復旧現場では「原状復旧」が行われる場合が多く、再発を招いている。
８．仕上げ材の設置位置、形態、材質を決定するのは多くの場合、意匠設計者であるが、意匠設計者の安全に対する問題意識の啓発が極端に遅れている。
９．天井は「仕上げ材」であって、典型的な「非構造材」にもかかわらず「構造材」と同じ方法で解決しようとする傾向があり、健全な解決策の選択肢を狭くしている。
１０. 仕上げ材の耐用年数は構造部材に比べ短いことを前提として設計施工されるが、管理者側には伝わらず、劣化や損傷したまま使い続けることが多い。
１１. 仕上げ材の防火要求に関する高さ方向での緩和に関する知見が乏しいため、安価で重たい不燃材が不用意に高所に設置される傾向を助長している。

等々である。

本特別調査委員会では、これらの問題の本質を見極め、基本的な概念を整理することに最初の重点を置いた。非構造材の中でも特に「天井材の落下事故の防止と解消」を主なテーマとし、可能であればその周辺の仕上げ材や設備機器にも言及するというスタンスをとっている。その上で、天井等の非構造材の落下事故を有効に防止解消するための考え方、方法、知見をなるべく基本に立ち返り、整理した形で提示し、その成果を広く建築関係者に発信する

ことを目標として活動を行ってきた。本報告書は、最終報告書であると同時に、実用性のあるガイドラインとして広く活用されることを目指している。

従って、基本概念や技術的知見は最新のものを取り入れ、現時点での最も望ましい解決策を提示している。一方で、旧態依然とした現行規基準類との整合性に引っ張られ歪められることのないように配慮している。現行規基準との関係を記述する必要のある場合も、参考程度留めており、規基準類を学ぶためのテキストではないことを読者には了解願いたい。最新の知見を取り入れるため、特別調査委員会の存続期間内は適宜更新していく予定である。

本報告書で最も基本とする考えは「確実な人命保護の実現」である。天井材等の非構造材の落下事故対策が遅々として進まなかった理由の一つは、確実な「人命保護」と、本来要求レベルの異なる「機能維持」がない混ぜになって議論されてきた点にある。本報告書では、高所設置の天井材に対しては「硬く・強く・重く」から「軽く・柔らかく」へと発想を変えることにより、多くの問題点が無理なく解決できることを示している。さらに「適材適所」の考え方により、設計から利用者まで建築に関わる全ての人々が、今後の安全安心な建築空間の目指すべき姿を自然に共有することが可能であることを示している。

1.2　背景

建築空間には元来、シェルターとしての機能が期待されており、過酷な自然環境や様々な危険から人命を護るための外殻構造としての役割を担っている。特に、地震、台風を始めとする自然災害の多い我が国においては、地震荷重や風圧力、積雪荷重等に対して建築構造躯体が耐えるべき様々な力学的安全性の下限値が規定されてきた。これが人命保護の観点で建築物に期待される力学的安全性の重要な下限値として、設計者から利用者まで共通の認識となっている。この力学的安全性を支えるのが構造躯体であり、これを実現するために、構造部材には材料管理、設計から施工まで慎重に監理実施される体制が整えられている。したがって、構造によって実現されているこの安全性能を天井材等の仕上げ材や非構造材の落下事故によって低下させてしまうことは必ず避けなくてはならない。特に、

１．大勢の人が集まる、２．高所、３．大面積、

という３つの条件の揃った場所に設置された天井は、落下事故時に人命に危害を及ぼす潜在的な危険性が非常に高いことから、格段の注意を必要とする。

構造材と非構造材の違いを、建築物の建設過程に沿って単純化して示すと図 1.1(a)のようになる。構造材は、重力を始めとする様々な力学的外乱に対して建築物の力学的な安全性を実現する。この安全性を実現するために、構造材は材料品質、設計から施工まで慎重に監理実現される体制が整えられている。これに対して、非構造材は快適性や利便性などの機能を実現するために、構造躯体の中に作りこまれていくものである。特に、天井を始めとする仕上げ材は、建築利用者に最も近い位置で、美観や快適性に関連する様々な機能を実現する

ために使用される。建築の内面をくまなく覆う場合も多く、施工時には大面積にわたる複雑な造作を如何に短時間に美しく完成させるかが強く求められ、施工性が重視される。

以上のように、構造材と、天井等の非構造材は全く期待される機能も設計施工の状況も異なるものである。

非構造材には様々なものがあるが、屋内空間に存在するものとして、設備機器等と天井や仕上げ材などがある。設備機器や配管･配線等は電器･機械系のものが多く、重量物となってしまう場合が多いが、同時に屋内空間の中には「点状」（機器）や「線状」（配管･配線）に存在するため､これらの落下現象の制御は落下防止ワイヤーなどを用いて比較的明快に規定することができる。一方、天井材などの仕上げ材は「面」として連続的な広がりをもって存在するため、落下時の影響範囲も大きく、落下現象の制御には特に注意が必要となる。

この様な対比の中で、天井等の仕上げ材のもつ大きな特長は、特別な場合を除いて「軽量柔軟化が可能である」ということである。軽量化によって重力や地震力の影響を格段に減らすことができるだけでなく､柔軟化することで変形追従性や、万が一の落下時にも人体に危害を及ぼす可能性も大幅に低減することができる。このような利点を活かすことなく､やみくもに耐震補強を行えば､安くて重たい天井材を支えるために、高価な下地材を大量に用いるという本末転倒が発生し、天井はいたずらに重たくなるばかりでなく、さらに地震力を呼び込むことになる。まず、適材適所の発想で賢明な材料選択を行うことで、より安全でかつ快適な空間の構築につなげて行くことが可能となるのである。

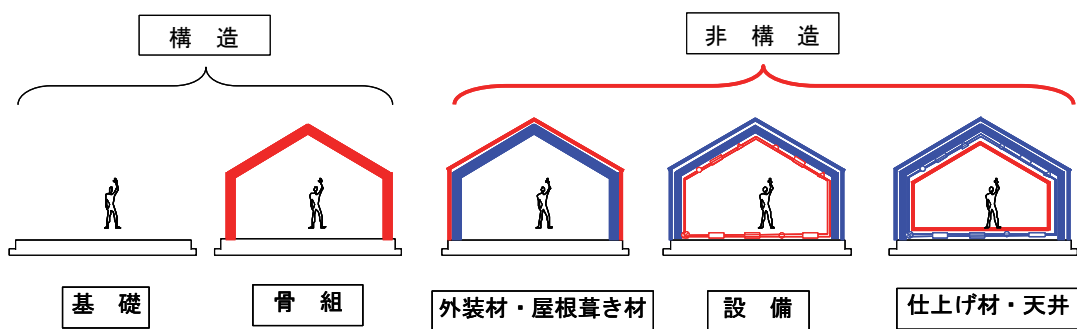
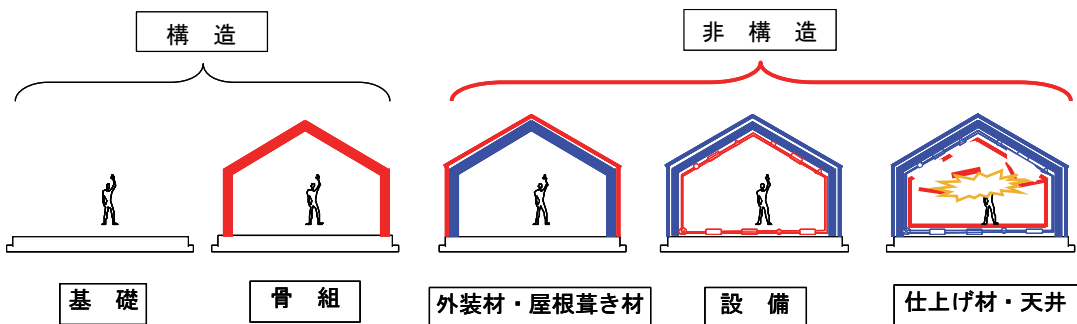



図 1.1　建築物の建設過程における構造材と非構造材及び天井落下事故

表 1.1　人命保護と機能維持の考え方

人命保護	機能維持
確実に実現すべき性能	「人命保護」を確実に実現した上で施設ごとに発注者と設計･施工者が合議し、外力レベルと維持すべき機能を個別に設定し実現する性能
落下現象の制御	対応する外乱や維持すべき機能に対する天井および設備機器などの損傷制御
安全性評価法の活用 軽量柔軟な天井材の採用、直天井化 フェイルセーフの活用 準構造の活用 さらに多くの選択肢…	水平力：耐震化、制振化等、 劣化：湿度、水対策、防錆処理等 風圧：圧力変動処理、下地の補強等 振動：防振処理等 さらに多くの選択肢…

1.3　本報告の構成

本報告書では、まず第 2 章で天井に要求される安全性能の概念を「人命保護」と「機能維持」の２つの基本的なレベルに分けて提示している。

「人命保護」は建築物の最低限の安全性として確実に保証されるべき性能であり、平時、非常時にかかわらず、必ず実現されなければならない。その対策は主に落下現象の制御を中心とする。「機能維持」は建築物の社会的あるいは経済的な役割により、施設ごとに異なり、発注者側と設計・施工者が個別に機能維持レベルを相談し設定すべき性能である。

「機能維持」は様々な外乱に対する損傷制御を中心とする。地震力に対する損傷制御には耐震構造の知見が役に立つ場合もある。湿気や温度変化、風圧、振動などに対してはそれぞれの外乱に対する損傷制御を考える必要がある。どのような外乱レベルに対してどの程度の機能維持を準備するかについては、発注者側と設計・施工者側が事前に十分意思疎通を行った上で合意しておく必要がある。

第 2 章ではさらに、これら 2 つの基本概念を関係者がどのように建築空間の安全安心の実現へと活かしていくかについて、「設計の進め方」、「関係者の役割」、「改修」という項目を立てて説明している。

第 3 章では、上記の基本概念それぞれについて、より具体的な例を示しながら詳細に解説している。特に本報告書では、「人命保護」の下に、「安全性評価法」、「フェイルセーフ」、「準構造」等の概念を提示している。

(a) 各種天井材　　　(b) 石膏ボード

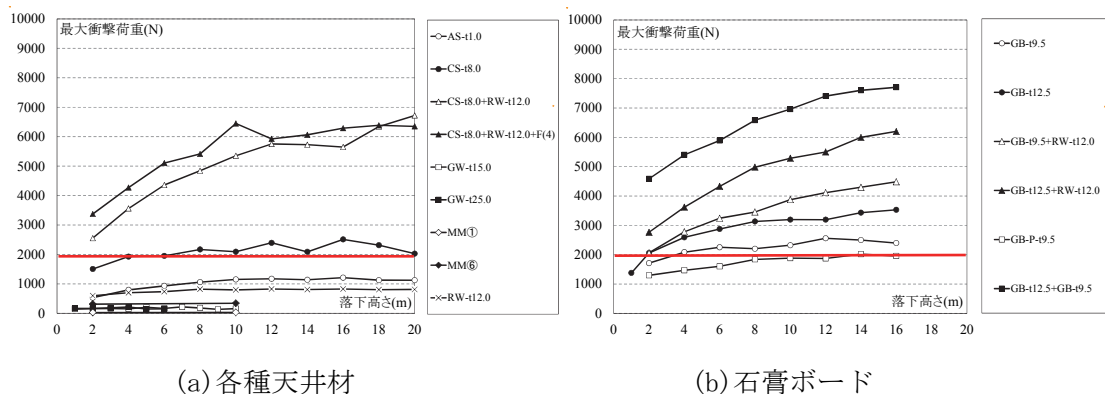



図 1.2　安全性評価法に用いる天井材の落下高さと最大衝撃荷重のグラフ

「安全性評価法」とは、天井材の材質と設置高さから発生しうる危険を予測し、適切な人体耐性指標と比較することで天井の安全性を客観的に評価する方法である。これにより、多くの天井の安全性を既存、新築に関わらず、簡単かつ客観的に評価することが可能となる。「フェイルセーフ」としては、落下防止ネットの設計方法等について具体的な知見を提示する。天井の全面落下を仮定した場合、落下防止ネットにはかなりの荷重がかかるため、それなりの構造的な配慮が必要となる。安全性上最も矛盾の生じ易い、劇場やホール等、空間性能として重量天井が必要な場合の「準構造」の概念についても提案している。準構造とは、重量天井などを仕上げ材の延長で実現することをやめ、構造材として設計施工を行うものであり、構造として監理された安全な重量天井面を実現するものである。

第 3 章ではさらに、損傷制御としての天井の耐震設計や各種劣化制御方法とその考え方についても述べる。また、設計の進め方として新築・改修・復旧のためのフローを示し、関係者の果たすべき役割等について述べている。

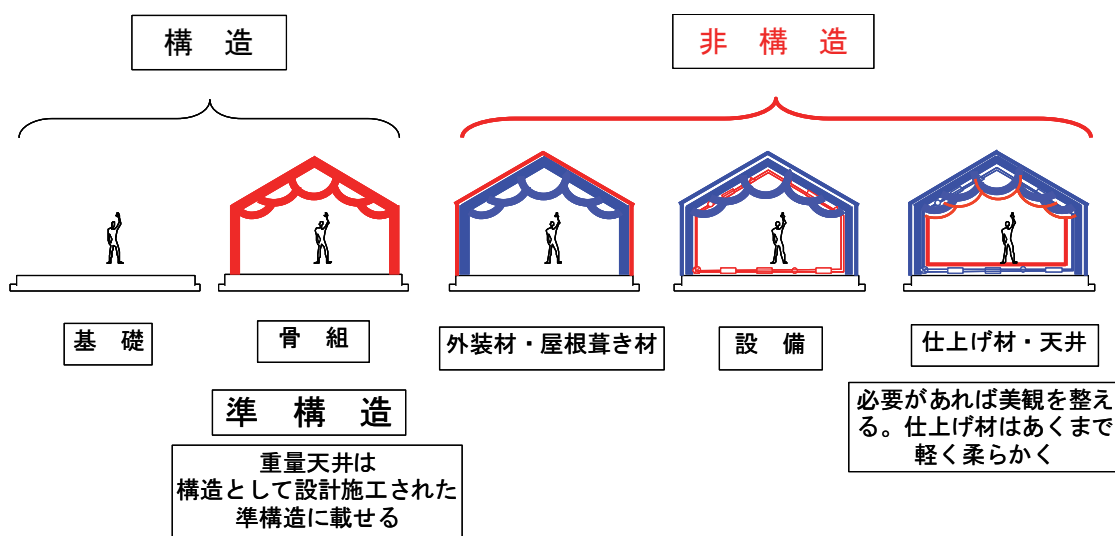



図 1.3　準構造の概念図

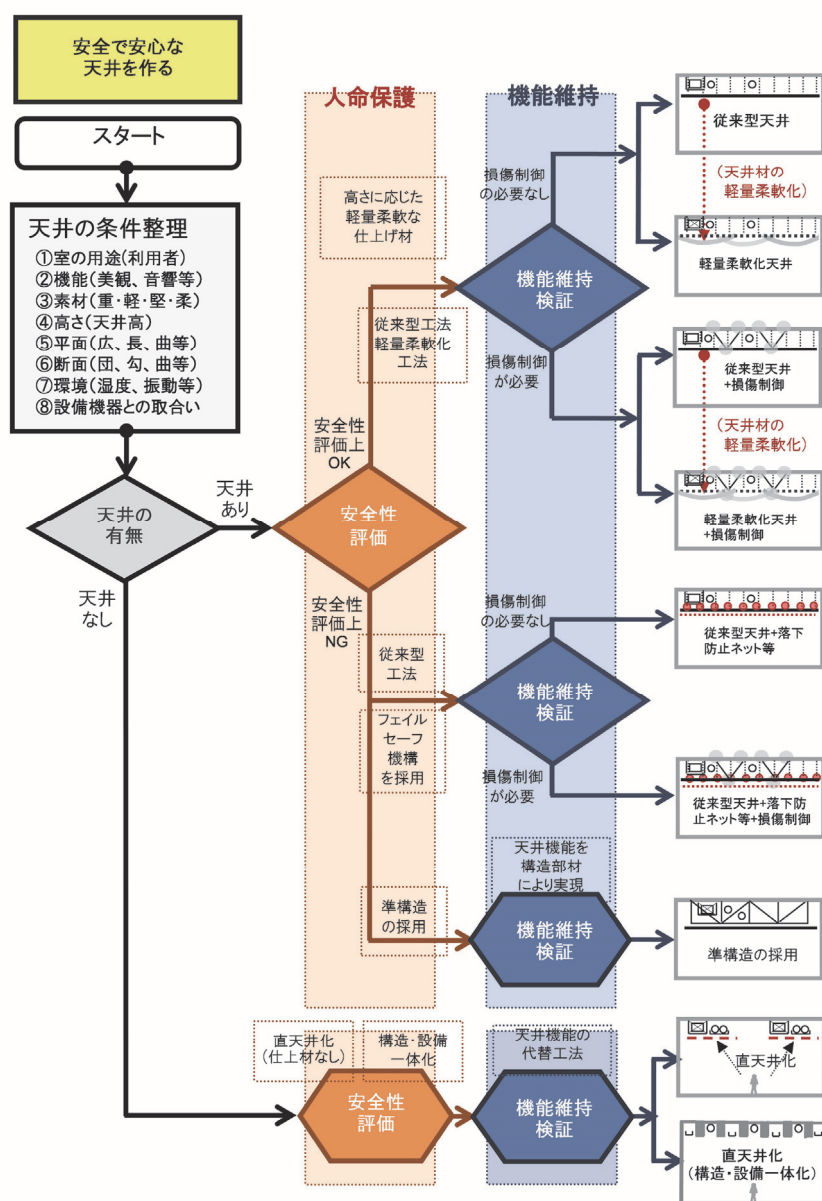



図 1.4　ガイドラインによる設計検討フロー

第 4 章では、実際の人命保護に対応する工法や、機能維持に対応する工法について、多くの事例を紹介している。

第 5 章では、今後の課題として、「意匠設計者の意識の啓発」「隠れた被害」「原状復帰の問題」「設備機器との関係」「落下防止と火災安全性の両立について」などについて言及している。

天井等の非構造材の設計は基本的に意匠設計者が行うものであり、天井の高さ、材質、形などは意匠設計者が決定するものである。「意匠設計者の意識の啓発」では、意匠設計者の安全意識を一層高めることが、天井等の非構造材の落下事故防止において最も重要なことである点について述べている。「隠れた被害」では、震災などで落下しなかった場合でも損傷が蓄積しているものがあるという点、「原状復帰の問題」では、事故発生後に安易な原状復

帰を促す旧態依然とした制度が危険な事故の再発繰り返しを招いている点を指摘している。設備機器は安全性上、天井等の仕上げ材と競合することが多く、重要な課題である。本ガイドラインでは、時間やスペースの都合上「設備機器との関係」については、限定的にしか触れることができていない。この点も第 5 章で課題として挙げている。

石膏ボード等の固く重たい天井材が､高所に不用意に設置されている大きな理由の一つは、これらの天井材が安価な不燃材だからである。「落下防止と火災安全性の両立について」では、高所の天井材に対しては不燃ではなくとも軽量柔軟な天井材が採用できるよう、高さ方向の不燃要求の合理的な緩和について検討を行っている。重たい天井材は、不燃か否かにかかわらず、落下によって消防士の救援活動を阻み殉職の危険もあることも知られている。

本ガイドラインには最後に付録として､2011 年 3 月の東日本大震災による被害の概要と、特別調査委員会で行った天井落下被害のアンケート調査について報告している｡鉄骨建物の最上階での被害が多いなどの特徴についても報告されている。

なお、本ガイドラインは、特別調査委員会の短い活動期間の中で、現時点での最新の知見を集約し、提示紹介することに努めたものだが、その性格上、内容は適宜更新されていくべきものである。2013 年 3 月から 2014 年 3 月の間は、特別調査委員会の活動も継続されるため、適宜更新していく可能性のあることを付記する。

1.4　過去の被害

吊り天井などの内部非構造材の落下事故は，平時にも頻繁に発生しているが、地震時は同時多発的に発生するため、大きな地震の度に報告されており、1923 年 9 月の関東大震災の報告書にも既に記述がある。典型的な在来天井の落下被害に関する報告は、1978 年伊豆大島近海地震における体育館の吊り天井の落下事故の調査報告（文献 1,2)の頃から見られ、その危険性が指摘されている。この頃から非構造全般の耐震化に対する意識がたかまり､本会では「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領」(1985 年)がまとめられている。また、天井材や懸垂設備の被害は平時にも発生しており、1988 年 1 月には六本木のディスコで大型照明器具が落下し、3 名が亡くなる大事故となった。これを契機に、｢懸垂物安全指針・同解説」(日本建築センター、1990)がまとめられている。

1994 年の北海道東方沖地震と同年の三陸はるか沖地震の際には体育施設や劇場などにおける天井等の被害があらためて指摘されている(文献 7)。翌年 1995 年の阪神・淡路大震災調査報告では当会シェル･空間構造運営委員会により大スパン建築の非構造部材や懸垂設備の被害例が多数報告され、構造被害に比して、非構造材被害の潜在的危険性を認識する必要性が高いことが特に指摘されている(文献 8,9,10)。阪神大震災では同時に，学校体育館等の避難所としての機能が社会的にも注目されるようになり､避難所機能の維持に対する非構造材の落下事故防止の必要性も議論されるようになった(文献 10)｡1994 年と 95 年のこれらの地震被害により，あらためて大規模集客施設の非構造材の危険性が認識されるようになった。

(a)1995 年阪神大震災時の天井落下

(b)非地震時の天井落下(2005 年)

(c)音響設備の落下(1995 年阪神大震災)

(d)照明器具落下(2004 年新潟県中越地震)

図 1.5　過去の天井等の非構造材落下事故の例

2001 年の芸予地震では天井や間仕切壁の脱落により負傷者が複数発生し，一般にも広く報道されたため,大スパン構造内部の非構造材被害の問題が社会的に注目される契機となった（文献 13,14,15）。この被害を受けて，はじめて，国土交通省から都道府県建築行政担当部長宛てに技術的助言が配信された(文献 15、国住指第 357 号)。

2003 年 7 月 26 日の宮城県沖地震の折には避難所の体育館の天井パネルにずれが発見され避難所としての継続利用ができなくなり,避難民が避難場所の移動を行ったことが報道されている。さらに，同年 9 月 26 日の十勝沖地震では釧路空港出発ロビーの吊り天井が約 300 ㎡にわたり脱落,管制塔内の天井も全面的に脱落し釧路空港が機能停止を余儀なくされたことなどが報道された(文献 18)。2004 年 10 月の新潟県中越地震では,長岡市内の市民体育館の多くで吊天井などの落下被害が生じた。この報告で、震度 5 を超えると天井落下被害が発生し始める傾向について指摘されている(文献 20)。その後、2005 年 4 月の福岡県西方沖の地震でも同様の被害が発生、2005 年 8 月に発生した宮城県沖の地震ではオープン間もない水泳場の天井が 9 割にわたって落下し、約 30 名以上の負傷者が出る惨事となった(文献 22,23)。その後も 2007 年 3 月能登半島沖地震、2008 年 6 月岩手・宮城内陸地震、2008 年 7 月岩手県沿岸北部地震、2009 年 8 月駿河湾沖地震等でも公共施設の天井落下事故が発生している。

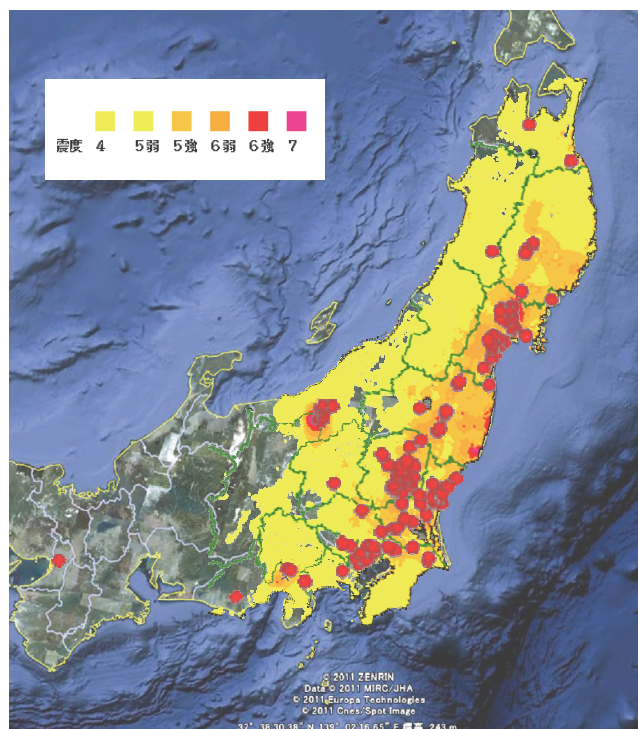



図 1.6　2011 年東日本大震災における天井落下被害と震度分布の関係
（赤丸は天井落下被害があった場所を示す）

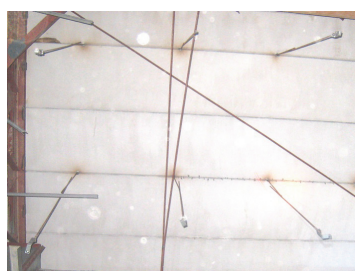
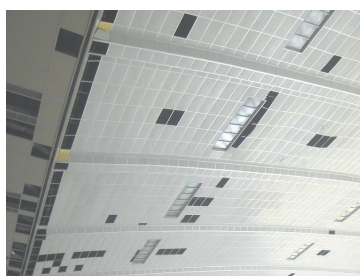
2011 年 3 月 11 日の東日本大震災では、夥しい数の天井落下事故が報告されている。文部科学省の平成 23 年 6 月末の調べでは 1600 棟以上の学校施設で天井落下が報告され、同じく 400 以上の学校施設で照明落下などが報告されている。国土交通省の平成 24 年４月の調べでは、天井落下施設の数は約 2,000 施設に及び、少なくとも５人が死亡、７２人が負傷していたとしている。本報告では 2011 年の東日本大震災の被害概要については本特別調査委員会が行った被害アンケートの結果も含めて、「付録」で紹介している。過去の地震被害調査から、天井等の非構造材の落下被害は、震度 5 弱を超えると発生し始める傾向のあることが経験的に知られており（文献 20）、構造部材の被害に比べて、より小さな地震でより広い地域で発生するという意味でも問題は深刻である。

地震時のみならず、平時の深刻な天井落下事故も多数発生している。2005 年 11 月には埼玉県内のスポーツクラブの水泳場の天井がある日突然、ほぼ全面にわたって落下、2008 年 1 月には豊田市内の水泳場の天井が突然 4m×20m の大面積で落下した。また、2010 年 6 月には新潟駅の通路天井が長さ約 10mにわたり落下、2011 年 10 月には新花巻駅の階段上の天井が約 9mにわたり突然落下している。

本稿をとりまとめている 2012 年 12 月には山梨県内笹子トンネルにおける天井板の崩落事故があり、9 名の尊い命が失われた。トンネル内構造物ではあるが、確実な人命保護を実現

するという発想が欠如している点で建築の非構造材落下事故と共通している。確実に防がなくてはならない事故を、不確実な方法で防ぐことはできない。

1.5　問題点

本報告で繰り返し述べているように、天井等の非構造材の落下事故は、地震時のみならず平時にも発生しており、その原因も一通りではなく、落下の様子も一様ではない。地震時に在来軽量鉄骨下地天井のクリップが変形して起きる落下事故のみが注目される場合が多いが、実際は様々な天井構法に対して様々な様態で落下事故が発生している（図 1.7）。

(a)ビスの頭抜け　(b)ハンガーの開き　(c)クリップの変形

(d)グリッド天井のパネルの脱落　(e)アルミスパンドレルの大量落下　(f)周辺部との衝突

(g)ライン型天井の脱落　(h)結露によるビスの頭抜け　(i)水を吸ったグラスウールの脱落

図 1.7　天井落下の様々な様態の例

天井等の仕上げ材は、汚れや陳腐化などが予想されるため、もともと構造躯体と同等の耐用年数は想定されていない場合も多い。ところが、様々な理由から管理者側は当初想定どおりの間隔での改修撤去を行わずに使いつづける場合が多い。我が国は高度成長時代から今日まで多数の建築物ストックを保持しており、現在はこの多数の建物内で落下防止対策のほとんどない非構造材が高所に設置された状態で利用されており、これらが年月を経て様々な理由で劣化しているのが実情である。高所設置の天井等の非構造材の落下事故防止は深刻かつ緊急性の高い問題である。

1.6　まとめ

本ガイドラインでは、天井材の落下被害の解消を主たる目的として述べている。考え方の基本となるのは、「人命保護」と「機能維持」のレベルの異なる基本概念である。天井等の非構造材、特に天井等の仕上げ材は内部空間の利用者に最も近いところにあるため、これらの損傷落下は利用者の身の安全に直結する。人命保護を確実に実現するためには、どのような時にもこれらによって人命に危害が及ぶことのないようにしなくてはならない。「人命保護」及び「機能維持」を無理なく賢く実現するためには、「適材適所」の発想が基本であり、これらの条件を有効に達成する天井材やシステムの選択が重要となる。

先に述べたように、天井等の非構造材の落下事故は以前より存在しているにもかかわらず、近年特に注目されるようになった理由としては、下記のような要因が考えられよう。

1．高度成長期から数多く建設整備されてきた建築施設内の非構造材が様々な理由で、構造材に先駆けて、劣化してきていること。
2．建物が大規模化する一方で、漏水や雨漏り、結露発生の箇所は増え、これを完全になくすことが難しいため、平時の天井材落下事故の原因となりやすい。
3．構造躯体の耐震性向上に伴い，特に地震時の非構造材の被害が目立つようになったこと。
4．室内環境の向上により空調機器や照明、音響機器、スプリンクラーなど様々な機器類が天井裏に密集配置されるようになり、これらの落下や他の天井材等非構造材との干渉などが発生しやすくなったこと。

などがあげられる。さらには、本報告の第 5 章で指摘している、意匠設計者の意識や、被災後の安易な原状復帰の問題、火災安全性とのバランスの問題なども挙げられる。

このように、天井等の非構造材の落下事故の問題は、以前より存在していたが、時代と共に顕在化してきた問題である。多数の大規模建築物の劣化が、ある程度進行してきた時期に入り、建築物の安全性能にかかわる新しい問題が浮上してきたと考えるべきである。この新しい問題に対して、設計者、施工者をはじめ、建築の生産過程に携わるすべての関係者が、謙虚な態度で、より安全で安心な空間の実現に責任感を持って慎重に関わっていく姿勢が大切である。法令を順守すれば責任を問われない、という発想ではなく、利用者の立場に立っ

て、より安全安心で豊かな建築空間をともに造り上げる、という態度が最も重要である。

本ガイドラインは、この新しい問題に対して、基本的考え方から事例紹介までを示し、なるべく実用上の参考になるように心がけて執筆している。しかし、本ガイドラインで示しているさまざまな提案や事例の中には、実際の適用にはまだハードルのあるものもある。このような場合こそ、関係者が連携協働することによって新しい事例を創造していく必要がある。

例えば、落下防止ネットを用いる場合、既存の落下防止ネット工法の多くは美観を損なうという先入観から敬遠される場合が多い。これは、より意匠性の優れた落下防止ネットのデザインやネット材料にまだまだ開発の余地がある、ということを示しており、意匠設計者や材料開発者の努力と連携によって新しい提案と事例を積み重ねていく必要がある。

また、本報告では、音楽ホールの様に重量天井が必要とされる施設では、準構造を用いることとしている。しかし、音響技術者側が確信をもって採用するには、実際に構造材を用いて形成した音響天井の音響性能に関するデータが必要となる。この分野では構造技術者と音響技術者が協働し、構造材で構成された天井面の持つ音響性能の知見を蓄積して行く必要がある。

「天井等の非構造材の落下被害防止」には、現在まで看過されてきた問題を新たな視点を持って解決していくという面がある。過去には参照すべき答が乏しく、新しい解決策を与えていかなければならない点が多々あり、関係者が連携して知恵を絞り、より安全で快適で豊かな未来を開いていく必要があるのである。このような問題に対しては、さらに規制を積み重ねてがんじがらめにするような旧態依然としたアプローチでは、決して健全な未来は切り開かれていかない。

平時に突然天井が落下する、という事故は、海外の非地震国でも頻繁に報告されているが、散発的な事故として扱われている場合が多い。日本は頻繁に地震に見舞われる国土にあって、天井等の落下事故の問題が早期に顕在化しやすかったと考えられる。この問題を世界に先駆けて解決しておくことは、国際的にみても、建築技術の発展上、意味のあることであると考えられる。

参考文献

1) 深尾精一，1978 年伊豆大島近海地震による体育館の天井落下について，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp. 541-542，1978.

2) 1974 年伊豆半島沖地震・1978 年伊豆大島近海地震災害調査報告，　日本建築学会 1980.

3) 1982 年浦賀沖地震災害調査報告　日本建築学会 1984 年.

4) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 日本建築学会 1985 年 11 月.

5) 「懸垂物安全指針・同解説」日本建築センター 1990.

6)　官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説　公共建築協会　1990.
7)　1994 年北海道東方沖地震災害調査報告・1994 年三陸はるか沖地震災害調査報告, 日本建築学会 1996.
8)　川口健一，吉中進：平成 7 年 1 月 17 日兵庫県南部地震空間構造被害調査報告，1995.
9)　阪神・淡路大震災調査報告　建築編－3　シェル・空間構造　日本建築学会他　丸善，1997 年.
10) 石川浩一郎，川口健一，田川健吾，酒井達矢：兵庫県南部地震による学校体育館及び公共スポーツホール等の被害調査報告，日本建築学会技術報告集第 5 巻，pp. 96-101，1997 年 12 月.
11) 川口健一，古川立子：大スパン構造物内部の大型懸垂物の動的挙動に関する研究，平成 10 年度京都大学防災研究所研究集会，空間構造の耐震性能・評価をどう進めるか？論文集，pp. 35-46，1998.
12) 学校施設の耐震補強マニュアル　S 造屋内運動場編　文部省 1998.
13) 2000 年鳥取県西部地震災害調査報告, 2001 年芸予地震災害調査報告　日本建築学 2001.
14) 2001 年 3 月 24 日芸予地震被害調査報告-体育館など大空間を構成する建築物の天井落下-　国土交通省国土技術政策総合研究所, 平成 13 年 5 月 25 日.
15) 国土交通省「芸予地震被害調査報告の送付について(技術的助言)」国住 357 号平成 13 年 6 月 1 日. 7)国土交通省「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について（技術的助言)」 国住指 2402 号平成 15 年 10 月 15 日.
16) 国土交通省「地震時における天井の崩落対策の徹底について(技術的助言)」国住指第 1427 号平成 17 年 8 月 26 日.
17)　「非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計施工要領」日本建築学会 2003.
18) 2003 年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告，国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所，2003. 10. 14.
19) 2004 年度日本建築学会大会(北海道)構造部門(シェル･空間構造)パネルディスカッション資料「空間構造における非構造要素の耐震設計を考える―天井落下被害を中心として―」
20) 2004 年新潟県中越地震震災調査速報，平成 16 年 12 月，東京大学生産技術研究所　川口研究室，2004.
21) 福岡県西方沖地震震災調査報告　平成 17 年 4 月　東京大学生産技術研究所川口研究室.
22) 国土交通省：スポパーク松森における天井落下事故調査報告．2005. 8
23) スポパーク松森事故対策検討委員会：スポパーク松森天井落下事故調査報告書．仙台市．2005. 10

24) 2005 年度日本建築学会大会(近畿)構造部門(シェル･空間構造)パネルディスカッション資料「体育館・公共ホールの地震被害と耐震改修」
25) 川口健一「危険をはらむ大規模施設の非構造材」建築ジャーナル No.1095, pp.68-70, 2005.12.
26) 地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討中間報告, 一般社団 法人建築性能基準推進協会
27) 非構造部材(屋根、外壁、天井)の地震･風による被害の軽減化の研究　特別研究 39　日本建築学会 2008 年 3 月
28) 川口健一, 吉中進, 大塚彩, 片山慎一朗: 新潟県中越地震と同中越沖地震における大規模集客施設内部の非構造材(吊り天井)被害の比較, 日本建築学会技術報告集, 第 14 巻, 第 27 号, pp. 73-78, 2008 年 6 月.
29) 荻芳郎, 川口健一, 大矢俊治, 片山慎一朗, 熊谷祥吾, 櫻井重喜: 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震または 2008 年 7 月 24 日の岩手県沿岸北部の地震による大規模集客施設の非構造材被害, 技術報告集, Vol. 16, No. 33, pp. 821-826, 2010 年 6 月.
30) 大場康史, 荻芳郎, 川口健一: 2009 年 8 月 11 日駿河湾で発生した地震による大規模集客施設の非構造材被害. [pdf]
31) ｢構造用教材｣日本建築学会, 2003.
32) 非構造材の落下事故防止及び解消に関する特別調査委員会中間報告, シンポジウム東日本大震災からの教訓、これからの新しい国つくり, 日本建築学会,P.43-46.

各種天井工法

天井とは面を構成する天井材と、これを支える下地材と呼ばれる部材からなる。下地材は複雑なシステムを構成する場合もあるが、最終的には構造部材に荷重を伝達している。天井の構法には多種多様な方法が存在しているが、ここでは、本ガイドラインの中で登場する代表的な天井構法の例について以下に紹介する(文献 31,32)。

(a)天井裏からの見下げ図　(b)詳細図

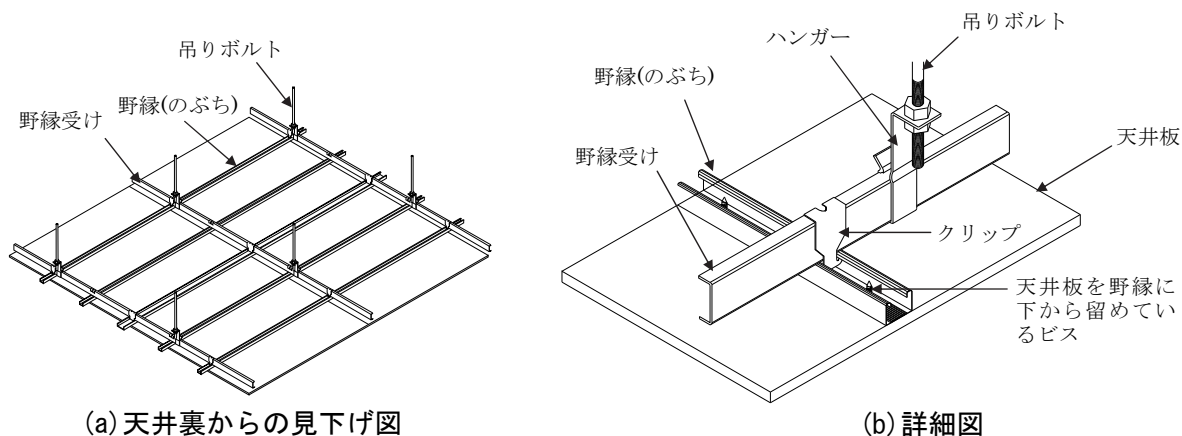



図 1.8　在来工法による軽量鉄骨下地の吊り天井の例

(a)天井裏からの見下げ図　(b)詳細図

図 1.9　ライン型システム天井の例

(a)天井裏からの見下げ図　(b)詳細図

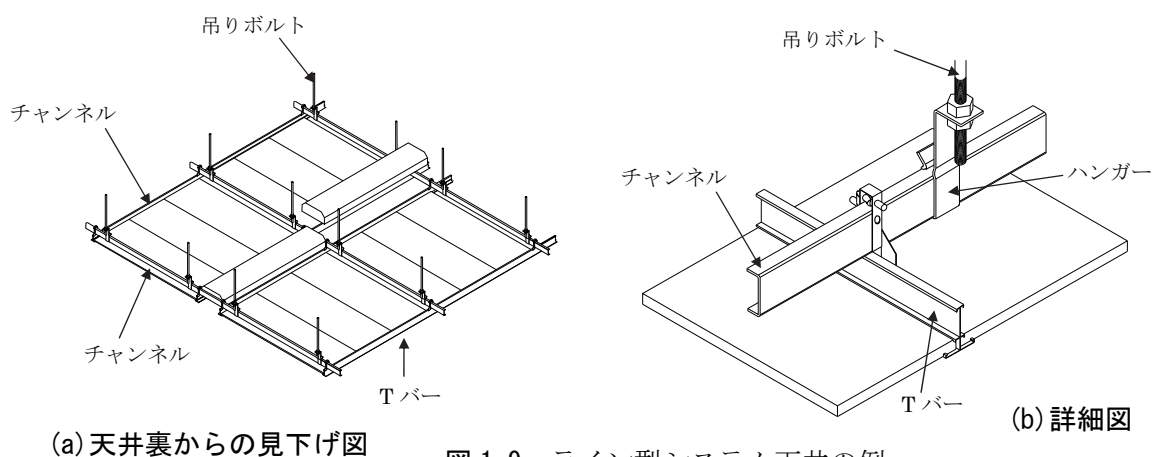
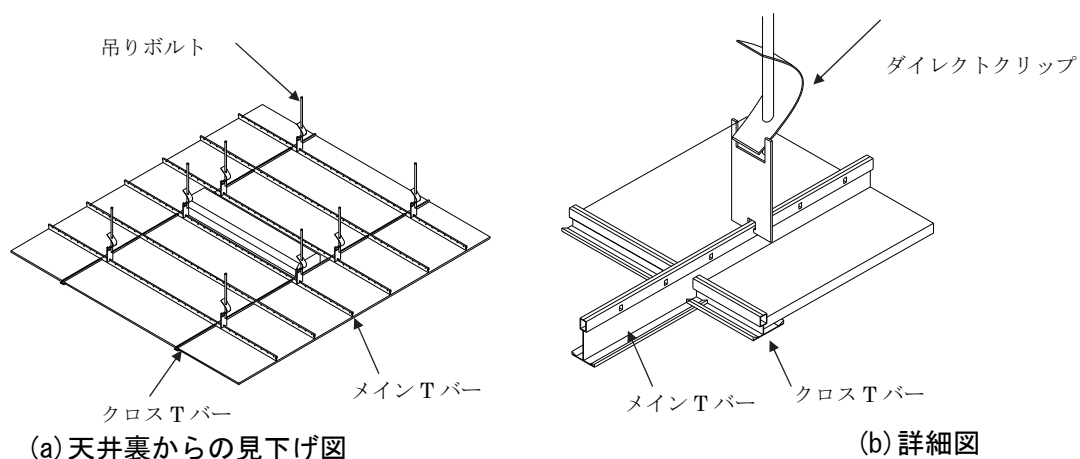



図 1.10　グリッド型システム天井の例

第 2 章　基本概念

2.1　人命保護

天井等の非構造材は、平時、災害時に関わらず、脱落、落下により人命に危害をおよぼしてはならない。

建築空間には元来、過酷な自然環境や様々な危険から人命を護るためのシェルターとしての機能が期待されており、さまざまな力学的外乱のもとで、その建築物の構造躯体が倒壊に至らない限り、人命は保護される、という了解事項がある。これが人命保護の観点で建築物に期待される力学的安全性の重要な下限値であり、設計者から利用者まで共通の認識となっている。したがって、構造躯体によって実現されているこの安全性能を天井材等の仕上げ材や非構造材の落下事故によって低下させてしまうことは必ず避けなくてはならない。

高所設置の仕上げ材や非構造材の場合、人命に危険を及ぼすのは、ほとんどの場合がこれらの落下現象であり、この危険防止の基本は落下現象の制御である。従って、高所に不用意に重量物を設置しないということは安全性確保の基本的事項である。また、高所設置が必要な部材に十分に軽量柔軟な材料を選定すれば、万が一落下が発生しても人命を保護することができる場合も多い。

天井等の高所設置の仕上げ材の有する潜在的な危険性は、設置高さと材質を考慮した適切な「安全性評価法」によって判断することができる。さらに、危険性を判断したうえで適切な落下現象の制御を行うことで、確実に「人命保護」を実現することが可能となる。

既存の施設などで「安全性評価法」によって潜在的な危険性があると判断される場合は、落下防止ネットなどの「フェイルセーフ」を設けることによって落下制御を行い、「人命保護」を確実にすることが可能である。重量設備機器の場合は落下防止チェインの設置などが有効である。

また、コンサートホールの音響性能など施設の基本的な性能実現のために高所に質量の大きな面がどうしても必要な場合がある。このような場合は、これらの質量のある面を天井等の仕上げ面として実現することをやめ、設計当初より構造部材として計画、設計、施工し、構造躯体と全く同等の安全性を持つ部材として実現するべきである。このように、建物を支えるのではなく音響性能などの機能実現のために用いられる構造部材を、本ガイドラインでは「準構造」と呼んでいる。

これら、「安全性評価法」、「フェイルセーフ」、「準構造」といった概念については、本ガイドラインの中で項を立てて説明する。

2.2　機能維持

人命保護を確保した上で、必要に応じて機能維持を実現する。

建築空間の性能として平時、非常時に関わらず、構造躯体が倒壊に至るまでは「人命保護」は絶対に実現されるべき最低限の性能として要求される。しかし、建築空間にはさらに、用途に応じて、居住性、快適性、生産性等といった様々な付加的な機能が求められる。即ち、「人命保護」を実現した上で、さらなる要求として機能の実現がある。実現すべき機能は、建築空間の用途と発注者側の要求によってさまざまに異なる。平時の機能実現に加え、非常時の「機能維持」が要求される場合は、「どのような外乱のどのようなレベルに対して、どのような機能を維持するか」という個別の問題が生じ、この点は発注者と設計者、施工者等の間で十分に合意形成をし、実現していく必要がある。

非常時には、防災上の重要拠点での機能維持や、避難所としての機能維持、企業の事業継続性上の機能維持など、さまざまな種類の機能維持要求がある。また、通常の建物でも避難径路では空間としての機能維持が重要である。

機能維持を要求する場合は、想定されるさまざまな外乱に対して損傷制御を行うことが有効であり、代表的な損傷制御に、地震外力を想定した耐震補強などがある。また、屋内プールの天井等では湿気や塩素による劣化損傷を防ぐための損傷制御が要求される。
いずれの場合も、機能維持が検討される以前に、人命保護(落下制御)は確実に実現されていなければならない。

2.3　設計の進め方

新築、改修、災害復旧時を問わず、設計者は単に法規を順守するのみでなく、建物を利用する全ての人々の確実な人命保護を実現し、発注者との十分な合意を図りながら、より安全安心な建築空間を実現する。

新築、改修、災害復旧時における設計の進め方は、人命保護の実現を最優先とし、単に法令を遵守するのみならず、安全評価法による検証により建物を利用するすべての人々の確実な人命保護を実現し、要求される機能維持の検討を行ない、天井工法の選択を行う。設計者はその過程で発注者との十分な合意形成を図り、合意内容を実現する。

単に法令を順守すれば責任が回避されるという発想ではなく、利用者の立場に立って安全安心な建築空間の実現に努める。

特に災害復旧時では、速やかな復旧を優先するあまり「原状復旧」が選択されがちであるが、安易な「原状復旧」は再発を招く。必ず、安全性評価を行い確実な人命保護を実現するよう努める必要がある。

2.4　関係者の役割

建築物の天井等の非構造材に携わるすべての関係者は、それぞれの立場で、人命保護と機能維持において果たすべき役割と責任を認識し、脱落・落下等による人命に危険を及ぼすことの無い、安全な建物を社会資本として提供する。

天井等の非構造材に携わるすべての「関係者」は、平時はもちろん地震などの災害時、材料劣化やさまざまな外乱に対しても、建物利用者の人命を守る役割と責任を持つ。関係者は、それぞれが役割を果たすことで社会資本を整備・維持し、結果として社会の信頼を得る。

ここでいう「関係者」とは、発注者、設計者、施工者、専門工事業者、材料製作業者、完成後の建物所有者・運用者、保守メンテナンス業者等の建設事業側はもとより、立法、官公庁等の行政、確認検査機関、学術研究者等の仕組みを司る側をも包括して示す。更に意匠、構造、設備その他関係する全ての業種においてその専門性分野には境界を設けること無く、すべてを含むものと解釈する。

従来、企画の開始から完成・運用までの一連の建物建設システムにおいて、「関係者」間での連携や責任分担が明確であったとは言い難い。度重なるなる脱落被害の経験をもってしても非構造材、特に天井等の脱落防止に関しては、残念ながら専門性を有する立場として、守備範囲を超えて一致団結して立ち向かってきたとは言えない。

非構造材、特に天井（頭上に存在する全てを含む広義の天井）に関係するすべての「関係者」は、過去の被害から目を逸らさずに、役割分担とその責任を意識し、脱落・落下等により人命に危険を及ぼすことの無い、安全で安心な建物を社会資本として提供しなければならない。

2.5　改修

人命保護が確実でない天井等の非構造材は速やかに改修あるいは撤去する。

適切な安全評価法を適用し、安全でないと判断された天井材は速やかに改修、あるいは撤去する。改修の方法としては、安全性評価法で安全と判断される天井材を設置するか、天井材を用いない直天井とする方法がある。また、安全性評価をクリアしない天井を利用し続けるには、フェイルセーフを設置するという方法もある。重量天井がどうしても必要な場合は、準構造化により安全性を担保する方法がある。

構造材と、天井等の非構造材は期待される機能も設計施工の状況も全く異なるものであり、そのように設計も施工もなされるため、一般に天井材等の非構造材の強度や耐用年数は構造躯体に比べてはるかに低く短く、脆弱な場所が散在したシステムとなる場合が多い。逆に、これらに構造材と同等の強度や耐用年数を実現しようとすれば、極端に経済性や合理性を欠いたシステムとなってしまう。

しかし一方で、管理者側は、天井等の非構造材も構造材と同様に長期にわたって利用し続けようとする場合が多い。そのためには確実な点検や維持管理が必要となるが、広大な面積を有する天井材の損傷劣化状況を目視や打音検査等で確実に把握し続けることは困難である。万が一、脱落した場合に人命に危害を及ぼす可能性を考えれば、安全性評価を満たさない天井材は速やかに改修あるいは撤去し、確実な人命保護を速やかに実現することが必要である。

第 3 章　解　説

3.1　人命保護

天井等の非構造材は、平時、災害時に関わらず、脱落、落下により人命に危害をおよぼしてはならない。

天井等の落下を発生させる直接の外力は重力である。

天井材を重力に抗して保持できなくなる理由は、天井材そのものや、これを支える下地材の、経年劣化、地震時損傷の累積、湿度等による材料劣化、温度変化による膨張収縮の繰り返し、風圧や振動、など多岐にわたる。現在用いられている多くの天井材は使用される環境によって材料劣化の度合いにも大きな違いが現れるため、竣工直後の性能がその後何年程度にわたって持続するかについても確実な評価を与えることは難しい。雨漏りや結露、スプリンクラーの漏水、温度変形、風圧や様々な振動、設備機器との干渉、など、周辺状況によっても大きく左右されるため、一般には材料単独の理想的な耐用年数よりも短くなる傾向がある。さらに、広大な面積の天井を限られたアクセス手段と照明の中で目視などにより確実に安全管理していくことも非常に難しい。従って、ごく限られた場合を除いて天井材の脱落を長年にわたって確実に防止することは難しい。

天井落下という事故を人命保護の観点から、自動車事故の考え方に倣って整理を試みると表 3.1.1 に示すように、大きく「予防安全」と「事後安全」に分けて考えることができる。この表 3.1.1 の 1 は、そもそも危険のもととなるものを設置しないという基本的な選択肢であり、仕上げ材の無い直天井化などに相当する。2 は構造躯体が倒壊するまで決して損傷しない天井を実現するということであり、上述の様に仕上げ材の範疇においてこれを確実に実現することは非常に難しい。本ガイドラインでは構造部材として設計施工された天井を「準構造」と呼んでいる(後出)。3〜5 は落下が発生した場合の被害軽減策である。3 はいわゆるフェイルセーフであり、落下防止ネットや落下防止ワイヤ等が考えられ、落下が生じても利用者のいる領域に達しないようにコントロールするという考えである。4 は、損傷落下が防げなくとも、その進行を非常に緩慢にコントロールすることができれば、損傷発生を確認した時点で、避難あるいはその天井材の撤去が可能、というものである。5 はその設置高さに見合った危険のない天井材のみを利用する、仮に落下が発生して人体に接触しても人命保護が可能な材料を用いる、ということである。これを実施するには危険度を判定するための安全性評価法(後出)が必要となる。本ガイドラインではこの安全性評価法についても提案している。6 は、机の下に潜ったり、天井のない場所へ移動するなど、利用者の行動によって安全確保を図る方法であり、建築側での安全性実現という観点だけで万全を期すことは難しい。7 は建築分野では「人命保護」としては一般に許容されない。

表 3.1.1　天井落下に対する人命保護の方針

安全	実現手段	具体的な方法
予防安全	1. 暴露コントロール	室内に入らない。 高所に危険な天井材を設置しない。
	2. 損傷防止	あらゆる外乱に対して天井材及び下地材を損傷させない。
事後安全	3. 落下防止	落下防止ネット等で利用者の活動領域に至る落下を防ぐ
	4. 損傷コントロール	目に見える形でゆっくり損傷を進ませることで確実に利用者避難あるいは天井撤去できるようにする
	5. 傷害コントロール	落下発生時に傷害程度を低減させる
	6. 行動の変更	事故に遭遇する危険を低減する(机の下へ潜るなど)
	7. 受傷後の管理	受傷後の速やかかつ十分な救助処置、治療、リハビリテーションを行う

3.1.1　安全性評価法

人命保護に関わる安全性は適切な安全性評価法を参考として判断する。

天井落下の安全性(或いは危険性)は、発生し得る天井落下とその天井材の接触により発生し得る人体傷害の程度によって客観的に判断することができる。このような安全性評価法は人命保護を実現する天井の設計施工時に役に立つと同時に、既存の天井の安全性を評価するために利用することができる。

天井落下を発生させる直接の外力は重力であるため、傷害の程度は主に落下する天井材の高さと材質によって決まると考えられる。従って、天井落下の安全性は落下する天井材が人体接触時に与える物理的影響と、人体側の耐性によってある程度、客観的に判断できる。

人体耐性に関する知見は主に自動車事故に関連して発達した傷害バイオメカニクスの分野で調査研究が進んでおり、これらの知見を応用することができる。本ガイドラインでは、種々の天井材が落下時に人体に与える衝撃荷重を実験等の手段により計測し、これと適切な人体耐性指標とを比較することで、天井の落下に対する安全性を客観的に評価する手法を示している。

1. 人体耐性値と傷害尺度

人体耐性の科学的な研究は19世紀頃からなされている(文献)が、特に自動車安全性の観点から1950年代以降に研究が活発になっている。調査の方法は、ボランティアによる人体実験、人屍体や動物を用いた実験、実事故における臨床観察、数学モデルによる方法等があり、これらのデータの蓄積とその分析により耐性値を把握する。しかし、人体耐性値は年齢性別や病歴体質などによる個人差が大きく、定量的な評価にはどうしても大きな幅が伴う。

天井落下事故において最も傷害を受けやすく重症度の高い傷害となり得る人体部位は頭部であるため、天井落下が人体に与える危険性を評価する際の代表値として頭部傷害を考えることができる。自動車事故における生涯所得の損失を概算し経済コストという観点から重み付けした研究によると、脳挫傷が圧倒的にコストが高く評価されている(文献11)。

傷害の「人命に対する危険度」の尺度として米国の AIS (Abbreviated Injury Scale)が知られている。AIS では、人体を９つの部位に分けて、0～6 の７つの傷害程度を表す順番が定義されている。頭部に関する AIS を表 3.1.1.1 に示す。頭部の最も重要な外傷は頭蓋と脳に対するものである。頭蓋の骨折は頭蓋低骨折、頭蓋冠の線状骨折と陥没骨折に分けられる。骨の変位のない線状骨折は AIS2 に分類される。骨の変位を伴う陥没骨折は AIS3 以上である。以下の人体耐性指標値では AIS2 以下で可逆的な傷害(後遺症なく速やかに元へ戻る)を許容する傷害レベルを閾値として用いている。

表 3.1.1.1　AIS(略式傷害尺度)

AIS:傷害度	頭　部
0：無傷	
1：軽傷	頭痛またはめまい感
2：中等傷	1時間未満の意識喪失,線状骨折
3：重症	1-6時間の意識喪失,陥没骨折
4：重篤	6-24時間の意識喪失,開放骨折
5：瀕死	24時間を越える意識喪失,100cc以上の頭蓋内血腫
6：即死	実質的に救命し得ない状況

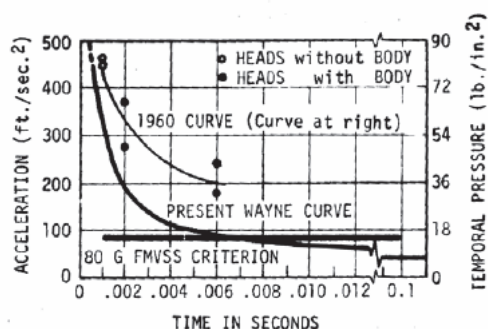



図 3.1.1.1　Wayne State Tolerance Curve
（文献13より転載）

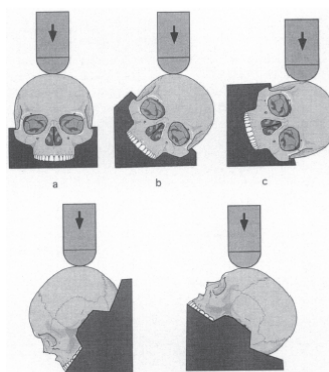



図 3.1.1.2　頭部の接触載荷実験方法の例[18)]
（実際には頭皮のついた屍体頭部などを用いる）

2. 頭部衝撃傷害耐性

(1) 衝撃加速度の時間積分を用いた評価

頭部傷害のメカニズムは接触傷害(局所、遠隔)と慣性傷害(並進、回転)に分類される。自動車事故では並進加速度や回転加速度が引き起こす慣性傷害は頭部傷害で最も重要な傷害であるが、天井落下事故においては、接触傷害が最も重要な傷害となる。頭部への荷重は静的荷重(200ms<継続時間)、準静的荷重(50ms <継続時間<200ms)、動的荷重(2,3ms<継続時間<50ms)に分けられる(文献7)。

衝突による頭部傷害の危険性を定量化しようと試みた初期の試みの一つとして1960年のWSTC (Wayne State Tolerance Curve)がある。これは横軸に頭部への衝撃作用時間、縦軸に加速度レベルをとったグラフに 6 つの点をプロットし、これを補完する曲線を引いたものである。評価点が、WSTCより下なら、せいぜい脳震盪程度であり永久的な後遺症はなく、一方、WSTCより上ならば生命の危険があるという閾値を与えるものである。これはAISの傷害度2程度を意識した閾値であり、我が国の「保護帽」の基準もWSTC上の点を力積の形に読み替えて用いている(文献)。

WSTC以降、これを改良する試みがなされ、GSI (GADD SEVERITY INDEX)、HIC (Head Injury Criterion) (文献15,16) 等が提案されている。これらは頭部衝撃加速度とその作用時間で定義し、AIS2相当の生命の危険性を与える閾値も同時に提案されている (文献7) 。

(2) 衝撃加速度を用いた評価(ECE、FMVSS等)

頭部の傷害耐性指標を、頭部が経験する最大衝撃加速度で規定する提案もあり、ECE 94(Economic Commission for Europe) 欧州経済委員会による基準 94 項「前面衝突時における乗員の保護」においては「衝突時の頭部の加速度が80g以下(3ms)」が規定されている (文献10) 。

(3) 衝撃荷重を用いた評価(実験による崩壊衝撃荷重)

加速度による評価のみではなく、頭部への接触を伴う衝撃荷重と頭部傷害耐性に関する研究も行われている。代表的な研究にYoganandan[18)]、Nahum[17)]等の研究がある。これらの研究では主に屍体頭部に対してインパクタなどで衝撃荷重を与える実験を行っている。これらの実験結果を1つのグラフにまとめたものを図3.1.1.3に示す。

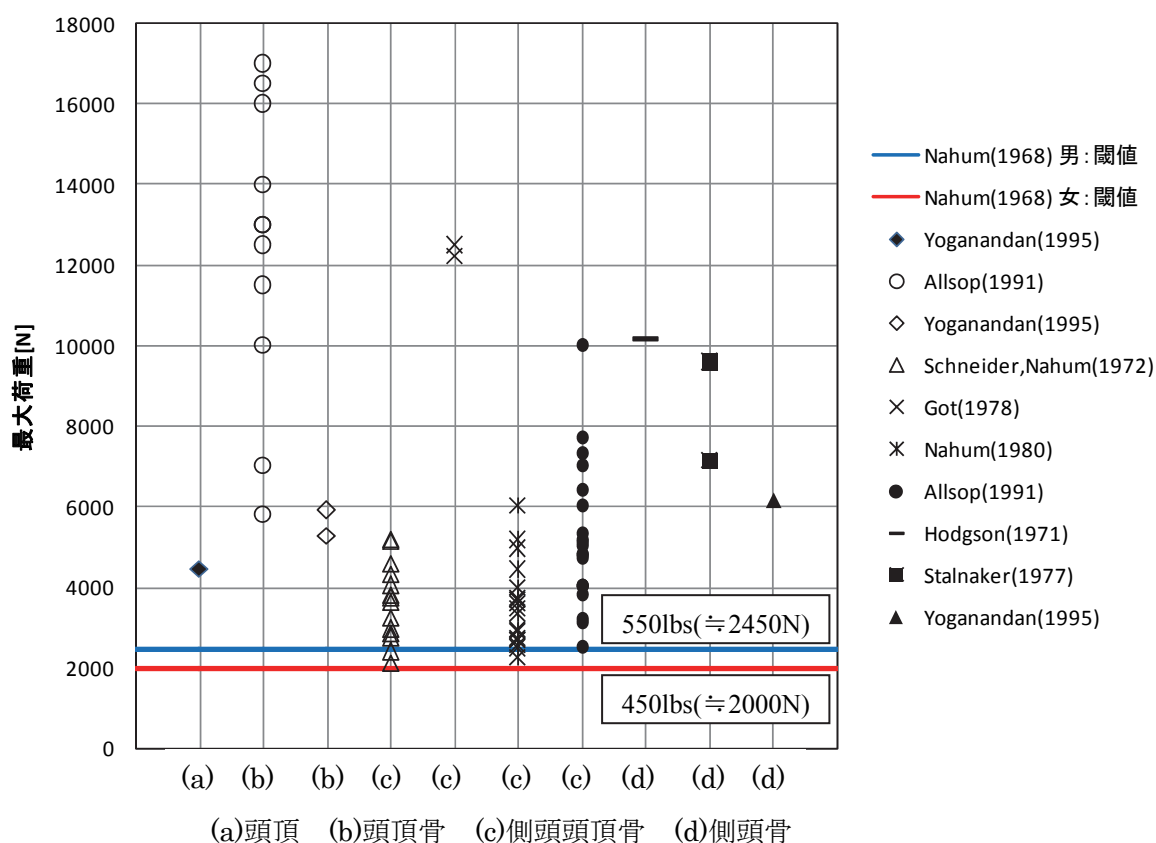



図 3.1.1.3　頭部へ接触により与えた最大荷重と骨折の有無の比較

図 3.1.1.3 の各実験における値に大きな幅が観察されるように、人体耐性は年齢性別や病歴体質などによる個人差が大きいため、定量的な評価にはどうしても大きな幅が伴う。また、それぞれの研究においてもインパクタの素材や大きさなどに違いがある。これらの研究の中で、Nahum[17]により提案されている側頭頭頂骨の傷害下限値（450lbs≒2000N)は、女性の側頭頭頂骨の崩壊荷重実験値を参考に決められており、インパクト面積が 1 平方インチ程度の時に有効であるとしているが、側頭頭頂骨は頭頂付近の骨としては崩壊荷重が低く、またこの値は既述の AIS のレベル 2 程度を意識して設定されており、比較的安全側の閾値を与えると考えられる。

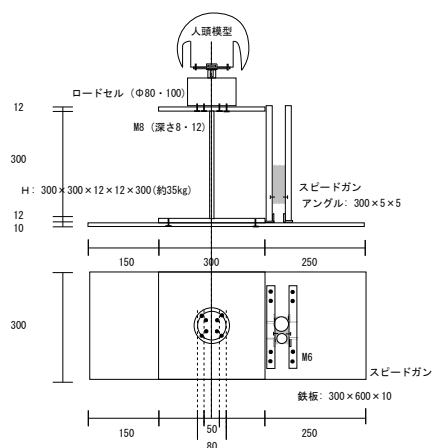
3.　各種天井材の人頭模型への衝突実験[31)-34)]

各種天井材が落下時に人頭へ与える力学的影響を計測するために、人頭模型への天井材の落下実験が行われている(文献)。人頭模型は乗車用人頭模型(マグネシウム合金製:JIS 規格)を用いており、図 3.1.1.4 のように H 形鋼及び鉄板の土台の上に設置されている。人頭模型の下に設置したロードセルで人頭模型への時刻歴衝撃荷重、人頭模型付近に設置したスピードガンで時刻歴距離等を計測している。

各天井材は水平を保ったまま、ほぼ中央で人頭模型に衝突するようにガイドワイヤーで

適度に拘束されている。サイズは市販の大きさを基準として用いており、多くの場合 910mm ×910mm である。これはパネルとして用いられた場合は市販のサイズで用いられ、それが落下する場合が多く、また、天井材の多くが人頭接触時にパンチング状の破壊性状を示し、落下天井全体の面積は余り関係がないことが予想されるなどの理由による。

これらの実験の結果得られた落下高さと最大衝撃荷重のグラフを図 3.1.1.5, 6 に示し、この実験に用いられた天井材と大きさ、質量等を表 3.1.1.2, 3 に示す。

ロックウール吸音板とアルミスパンドレルに関しては、実験に用いられた市販のパネルサイズが、そのほかのものと大きく異なる点に注意が必要である。また、本実験での落下高さは人頭模型頂部から天井下面までの距離であり、室内の天井高ではないことに注意する必要がある。

(a)計測器設置状況

(b)　実験装置全体図

図 3.1.1.4　人頭模型を用いた天井落下衝突実験の概要

表 3.1.1.2　落下実験に用いた天井材(石膏ボード)

略称	材質	サイズ(mm)	質量(kg)	実験内容
GW	グラスウール	990×990×25.0	1.2	1～6m、1m 毎、3 回ずつ
GW	グラスウール	910×910×15.0	1.1	1～10m、1m 毎、3 回ずつ
AS	アルミスパンドレル	132×1000×1.0	0.5	2～20m、2m 毎、3 回ずつ
CS	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	5.5	2～20m、2m 毎、3 回ずつ
CS+RW	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	9.5	2～20m、2m 毎、3 回ずつ
	ロックウール吸音板	300×600×12.0		
CS+RW+F(4)	ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	10.5	2～20m、2m 毎、3 回ずつ
	ロックウール吸音板	300×600×12.0		
	シングル野縁	2-17×25×0.8		
	ダブル野縁	2-17×50×0.8		
MM①	膜(ポリエステル布+塩ビコーティング)	910×910×0.6	0.2	2，10m、3 回ずつ
MM⑥	膜(ガラスクロス+フッ素コーティング)	910×910×0.8	1.2	2，10m、3 回ずつ
RW	ロックウール吸音板	300×600×12.0	0.7	2～20m、2m 毎、3 回ずつ

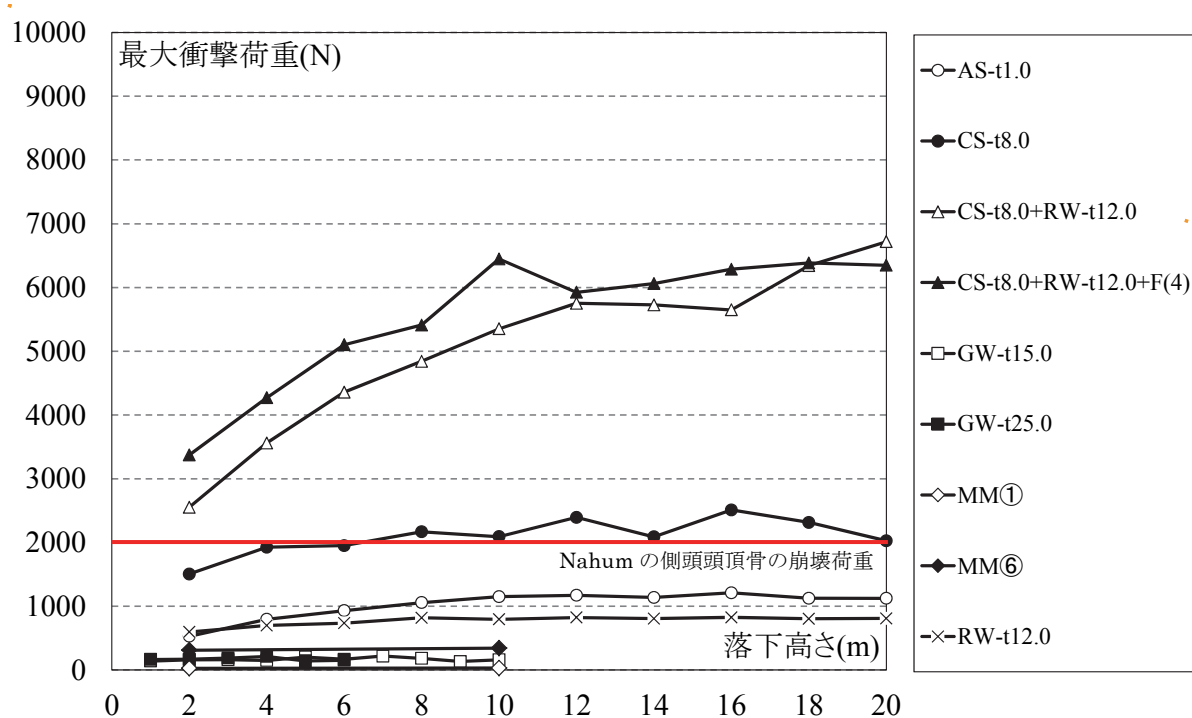



図 3.1.1.5　各種天井材の落下高さと最大衝撃荷重

表 3.1.1.3　落下実験に用いた天井材(石膏ボード)

略称	材質	サイズ(mm)	質量(kg)	実験内容
GB(D)	化粧石膏ボード	910×910×9.5	6.1	2～16m、2m 毎、4 回ずつ 但し 6,10m のみ 5 回ずつ
GB(R)	石膏ボード	910×910×9.5	6.5	10m、3 回
GB(R)	石膏ボード	910×910×12.5	8.1	1m, 2～16m、2m 毎、3 回ずつ
GB(R)+RW	石膏ボード	910×910×9.5	8.6	2～16m、2m 毎、3 回ずつ 但し 2,4m のみ 4 回ずつ
	ロックウール吸音板	300×600×12.0		
GB(R)+RW	石膏ボード	910×910×12.5	10.0	2～16m、2m 毎、3 回ずつ 但し 12m のみ 4 回
	ロックウール吸音板	300×600×12.0		
GB(P)	石膏吸音ボード	910×910×9.5 (孔径 6mm、ピッチ 22mm、孔数 40×40)	6.1	2～16m、2m 毎、3 回ずつ 但し 8,12m のみ 4 回ずつ
GB(R)+GB(D)	石膏ボード	910×910×12.5	12.8	2～16m、2m 毎、3 回ずつ 但し 8,12,16m のみ 4 回ずつ
	化粧石膏ボード	910×910×9.5		

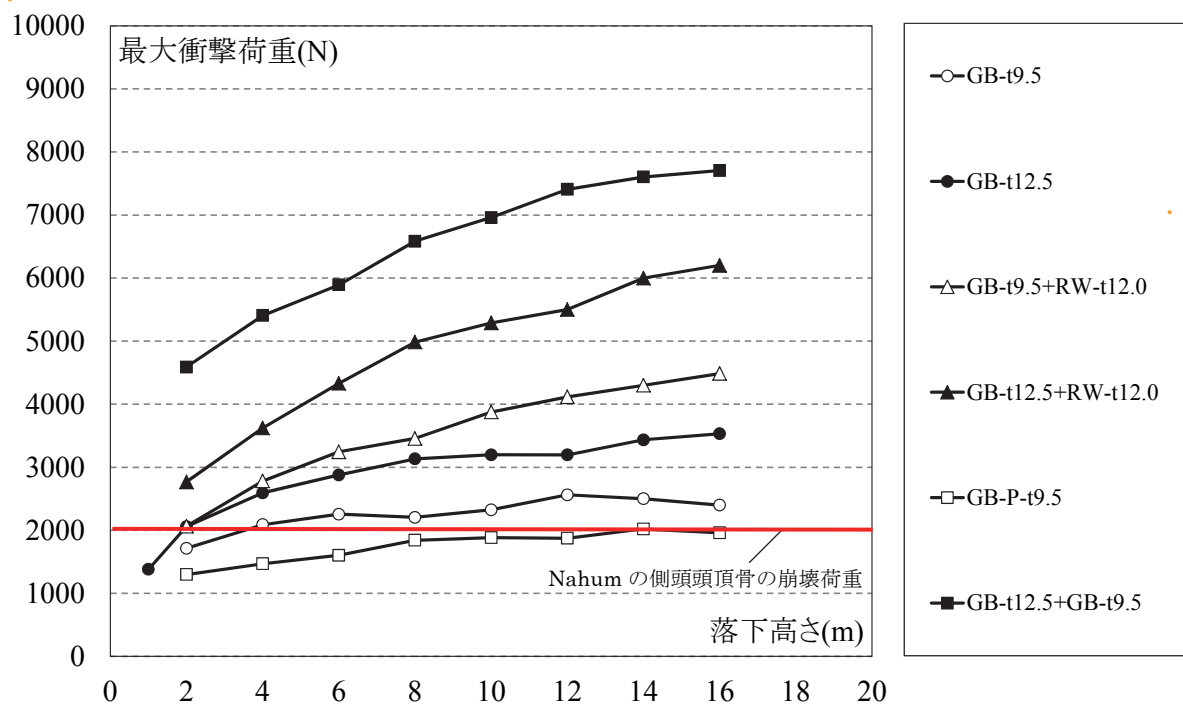



図 3.1.1.6　各種天井材の落下高さと最大衝撃荷重(石膏ボード)

4. 人頭模型への衝突実験値と頭部傷害耐性を用いた安全性評価法

以上２節と３節の調査結果を比較することで天井材の安全性評価が可能となる。つまり、頭部衝撃傷害耐性の閾値として、比較的安全側と考えられる Nahum の 2000N を採用するとすれば(図 3.1.1.3)、図 3.1.1.5, 6 において 2000N 以上の衝撃荷重を与える場合は、当該天井材を当該高さに設置することは潜在的に人命に危害を及ぼし得るということになり、2000N を超えない場合には、仮に落下して人体に接触しても人命に危害を与える可能性は少ない、と判断される。これにより、それぞれの天井材に対して、たとえ落下しても人命に危害を加えることなく使用することの可能な高さを知ることができる。

このような安全性評価法を利用するにはいくつかの注意が必要である。

１．本実験では実験の再現性を重視し、アルミ合金製の人頭模型を用いている。実際の生体の人頭と人頭模型が受ける最大衝撃力には何らかの差異があると考えられるが、過去の天井落下と傷害発生の被害事例などと照らし合わせて、この安全性評価法での評価は概ね妥当と判断している。この点は、さらなる知見の蓄積により精度の検証が必要となると考えられる。

２．図 3.1.1.5, 6 のグラフの横軸の「落下高さ」の定義に注意が必要である。即ち、ここでの「落下高さ」とは、人頭模型の頂部から、天井材下面までの高さであって部屋の天井高ではない。従って、部屋の天井高によって評価する場合には、その部屋の標準的な利用形態を考慮する必要がある。例えば、その部屋が会議室のように主に座位で利用される部屋であれば、落下高さは天井高から利用者の座高を引いたものと考えられる。展示場の様に主に立位で利用される場所であれば、天井高から利用者の身長を引いたものが落下高さと考えられる。

３．本安全性評価法では、鋭利な角等をもった天井材や下地材による傷害については考慮していない。従って、落下の可能性のある部分に、人体を傷つける鋭利な角等をもった天井材や下地材は使用しないようにしなくてはならない。本実験で用いたアルミスパンドレル等の金属系の材料には鋭利な角部を有するものもあり、落下実験による最大衝撃荷重値が低い場合でも、そのような部分のある天井材は避けることが望ましい。在来軽量下地の天井では、野縁やクリップ等、またそれを止めつけるビスなどは鋭利な部分を有しており、これらの落下は極力避けることが望ましい。

４．在来軽量下地工法の天井では、いわゆるクリップ部の損傷により天井材と野縁が一体となって落下する場合がある。この場合は、図 3.1.1.5 の△CS-t8.0+RW-t12.0 の試験体と▲CS-t8.0+RW-t12.0+F(4)の試験体の比較に見られるように、下地材の存在により最大衝撃荷重が増加する傾向がある。具体的な最大衝撃荷重に関しては今後のデータの蓄積が必要である。

5. まとめ

人体の耐性や天井材の落下接触という現象にはそもそも様々な幅があり、確定的な議論は難しいが、「人命保護」として、AIS のレベル 2 以下(人命に深刻な危害が及ばないレベル)を想定し、これに基づいて提案された頭部の衝撃傷害耐性値と各種天井材の人頭模型実験結果を比較することで可能となる安全性評価法について紹介した。このような安全性評価法は、新築設計時の天井だけでなく、既存の天井の安全性を評価する際にも用いることができる。

しかし、前項に述べたように、この安全性評価法では、鋭利な角等を持つ天井材や下地材については考慮しておらず、このような危険な部材は落下の可能性のある部分には使用しないことが必要である。

また、この安全性評価法で採用している Nahum の閾値 2000N は成人女性の側頭頭頂骨の衝撃傷害耐性を元に決定されており、例えば子供等の耐性値はさらに低いと考えられる。従って、主な利用者が子供等の弱者と考えられる部屋の場合はさらに安全性に配慮した天井とすることが望ましい。

本安全性評価法は、限られた数の実験値の比較に基づいているため、今後、さらなる知見とデータが蓄積されることで改良されていく余地があると考えられる。

参考文献

1) 川口健一, 6.4.1 非構造材と設置高さ, 空間構造の動的挙動と耐震設計, 日本建築学会, 2006.
2) 大野忠雄, 黒澤美枝子, 高橋研一, 細谷安彦訳：トートラ人体の構造と機能 第 2 版, 丸善株式会社, 2007.2
3) 塩田浩平, 瀬口春道, 大谷浩, 杉本哲夫訳：グレイ解剖学 原著第 2 版, エルゼビア・ジャパン, 2011.8
4) 坂井建雄, [訳]小林靖, 小林直人, 市村浩一郎監訳：グラント解剖学図譜 第 6 版, 医学書院, 2011.4
5) James H. McElhaney, Verne L. Roberts, Joseph F. Hilyard:Handbook of human tolerance, Japan Automobile Research Institute, Inc., 1976
6) Hiroshi Yamada：Strength of biological materials, Robert E. Krieger Publishing Company, 1973
7) J.S.H.M. Wismans, 水野幸治, 一杉正仁訳：交通外傷バイオメカニクス, 安全部会歩行者保護分科会, 2003.5
8) 労働省：保護帽の規定, 労働安全衛生法第 42 条, 1976.1
9) U.S. Department of Transportation：FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard)

208 - Occupant Crash Protection, pp.744~745, 2008.10 edition

10) United Nations Economic Commission for Europe : ECE(Economic Commission for Europe) Regulation No.94, pp.10, 1958 agreement(Rev.1/Add.93)

11) 日本外傷学会・財団法人 日本自動車研究所：AIS90 update98 日本語対訳版，へるす出版，2003.12

12) Lissner, H. R., M. Lebow, F. G. Evans : Experimental studies on the relation between acceleration and intracranial pressure in man, Surgery, Gynecology and Obstetrics 111, pp.329~338, 1960.9

13) Richard G. Snyder : Human impact tolerance - American viewpoint, SAE Technical Paper 700398, 1970.2

14) Ono, Koshiro, Astumi Kikuchi, Marumi Nakamura, Hajime Kobayashi, Norio Nakamura : Human head tolerance to sagittal impact reliable estimation deduced from experimantal head injury using subhuman primates and human cadaver skulls, SAE Technical Paper 801303, 1980.9

15) Charles W. Gadd : Use of a weighted-impulse criterion for estimating injury hazard, SAE Technical Paper 660793, 1966.2

16) Versace, J. : A review of the severity index, SAE Technical Paper 710881, 1971.2

17) Nahum, A., Gatts, J., Gadd, C., Danforth, J. : Impact tolerance of the skull and face, SAE Technical Paper 680785, 1968.2

18) Narayan, Y., Frank, A. P., Anthony, S. J., Patrick, R. W., Channing, L. E., Daniel, J. T., Richard, G. S. : Biomechanics of skull fracture, Journal of Neurotrauma Vol.12 No.4, pp.659~668, 1995.5

19) Got, C., Patel, A., Fayon, A, Tarrière, C., Walfisch, G. : Results of experimental head impacts on cadavers : The various data obtained and their relations to some measured physical parameters, SAE Technical Paper 780887, 1978.2

20) Nahum, A., Ward, C., Raasch, E., Adams, S., Schneider, D. : Experimental studies of side impact to the human head, SAE Technical Paper 801301, 1980.9

21)Stalnaker, R., Melvin, J., Nusholtz, G., Alem, N., J. B. Benson:Head impact response, The 21st Stapp Car Crash Conference, pp.305-335, 1977.2

22) Schneider, D., Nahum, A. : Impact studies of facial bones and skull, SAE Technical Paper 720965, 1972.2

23) Allsop, D., Perl, T., Warner, C. : Force/deflection and fracture characteristics of the temporo-parietal region of the human head, SAE Technical Paper 912907, 1991.10

24) Narayan, Y., Frank, A. P., Biomechanics of temporo-parietal skull fracture,

Clinical Biomechanics Vol.19 No. 3, pp.225~239, 2004.3

25) Hodgson, V. R.：Tolerance of the facial bones to impact, Am. J. Anat., 120, pp.113~122, 1967.1

26) Hodgson, V. R., Thomas, L. M.：Breaking strength of human skull vs. impact surface curvature, US Department of Transportation, HS-800-583, Springfield, VA, 1972.6

27) Hodgson, V. R., Thomas, L. M.：Effect of long-duration impact on head, In: Proceedings of the 16th Stapp Car Crash Conference, pp.292~295, 1972 .2

28) Hodgson, V. R., Thomas, L. M.：Breaking strength of the human skull vs impact surface curvature, DOT-HS-801-002, 1973 .6

29) Hodgson, V. R., Thomas, L. M., Brinn, J.：Concussion levels determined by HPR windshield impacts, In: Proceedings of the 17th Stapp Car Crash Conference, 1973.2

30) 森本一史:人体の衝突障害耐性 -顔面-,豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.27 No.1, 1992.3

31) 内田拓見，川口健一，片山慎一朗：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その１ 人体耐性指標，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.1081～1082，2009.7

32) 片山慎一朗，川口健一内田拓見，荻芳郎：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その２ 天井材落下実験，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp.1083～1084，2009.7

33) 内田拓見，川口健一，荻芳郎，大矢俊治：人体耐性指標を用いた天井材の安全性評価に関する基礎的研究 その３ 天井材落下実験２，日本建築学会学術講演梗概集 B-1，pp.881～882，2010.7

34) 中楚洋介，川口健一，大矢俊治，荻芳郎，小澤雄樹，細見亮太，益田悠司，森大：天井材の安全性評価に関する基礎的研究:石膏ボード落下実験：生産研究 Vol.64 No.6, pp.95~100，2012.11

3.1.2　フェイルセーフ

天井落下により人命に危険が及ぶことが予想される場合、予め意識的な設計によって天井材の人体への接触を防ぎ、人命保護を達成する。

天井材の落下が発生しても、人命に危害を与えることがない材料であれば必然的に人命保護が達成される。しかしそうでない場合も、意識的な設計によって人命保護を達成することが可能である。つまり、安全性評価法によって危険と判断された場合でも、天井材の落下を許容しつつ、これを想定した意識的な設計を行うことによって人命保護を達成することができる。これを「フェイルセーフ」と呼ぶ。

例えば天井材の落下が発生しても、これが利用者の活動領域に達することがなければ、人命に危害を与えることはない。もっとも知られている方法は、落下防止ネットの設置である。また、天井パネルを通常の下地材とは独立に構造材へ緊結することによって落下を回避する「落下防止ワイヤ」という方法も考えられる(図3.1.2.1)。以下では「落下防止ネット」の設計上の注意点を中心に、フェイルセーフの方法について述べる。

1. 荷重

損傷などにより落下が発生した場合、フェイルセーフを構成するネットやケーブルおよびロープ等はその落下荷重を支える必要がある。代表的な天井材の重量を表3.1.2.1に示す。

天井材の落下によりフェイルセーフに作用する荷重は落下高さやフェイルセーフを構成する材料の柔軟性によって大きく異なるが、運動量の保存則から概ね次式で知ることができる。

$$f = \frac{m}{\Delta t}\sqrt{2gh} = 4.43\frac{m}{\Delta t}\sqrt{h} \qquad (3.1.2.1)$$

ここにmは落下物の質量、h は落下距離、g は重力加速度、f はフェイルセーフが負担する平均的衝撃荷重、Δt はフェイルセーフが機能してから落下物が静止するまでの時間である。落下距離 h は小さいと考え空気抵抗は無視する。 Δt =0.1(sec) とすれば $f = 44.3m\sqrt{h}$ (N)となる。

表 3.1.2.1　代表的な天井材重量

名称	サイズ [mm]	重量 [N/m²]
石膏ボード	910×910×9.5	53.9
ケイ酸カルシウム板	910×910×8.0	65.7
グラスウール	910×910×25	6.86
ロックウール吸音板	300×600×12	10.8
ケイ酸カルシウム板＋ロックウール吸音板	910×910×8.0+300×600×12	114.3
野縁＋野縁受＋金具	——	32.8

2. 落下防止ネット

人命に危害を与える落下事故を防止するための有効な方法として、天井直下に目の細かいネット(あるいはメッシュ)を張り、落下物を受け止める「落下防止ネット」の設置がある。「落下防止ネット」には以下のような利点がある。

1. 既存の天井に対しても設置が容易で天井裏に入る作業が極めて少なくて済む
2. 既存天井材の断熱性や音響性などの機能も温存できる
3. 既存の照明や空調、音響、スプリンクラーなどの機能を損なわない設置が可能
4. 設備機器の落下も受け止める設計が可能

連続した天井は最初に損傷した部分が垂れ下がり、その重みで次々と剥がれるように落下する場合もある。天井直下にネットを設置した場合は、天井が大きく落下する前にその重量をネットが受けるため、このような損傷の伝播を防止する効果もある。

落下防止ネットは目の細かいネットだけでは強度が不足する場合が多いため、ネットと補強ケーブルを組み合わせて用いる場合が多い。目の細かいネットで受けた落下物の荷重を補強ケーブルが支え、補強ケーブルは周辺の構造物にしっかりと定着され支えられる。最終的な定着部分は周辺柱や梁、壁などの構造躯体であり、これらの構造躯体は補強ケーブルに対する反力を与える必要がある。また、ケーブルやネットは常時のたわみを防ぐために、初期張力を導入する場合も多い。この場合、周辺構造物は常時、ケーブルの初期張力を支え続けなければならない。落下物発生時には、初期張力と、落下物重量により生じる付加軸力の両方を支える必要がある。また、(3.1.2.1)式が示すように、落下距離 h は小さい方が、平均的衝撃荷重 f は小さいので、ネットは天井材等の落下物からの距離 h をなるべく少なく保って設置することが望ましい。また平均的衝撃荷重 f を小さく抑えるためには、Δt が大きい方が有利であり、ネットはなるべく柔軟なものが望ましい。これはネットの目をバイアス方向（ひし目）に配置することなどでも実現することができる。

(a)落下防止ネットの設置例

(b)落下防止ワイヤ(ロープ)の設置例
(野縁のみを吊っている例)

図 3.1.2.1　フェイルセーフ設置の例

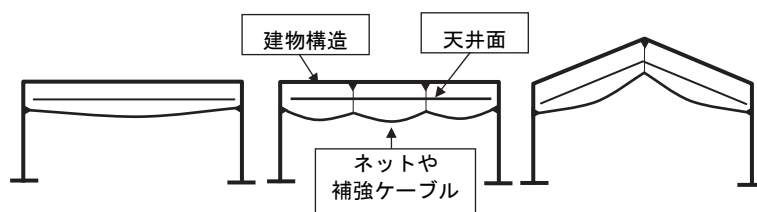
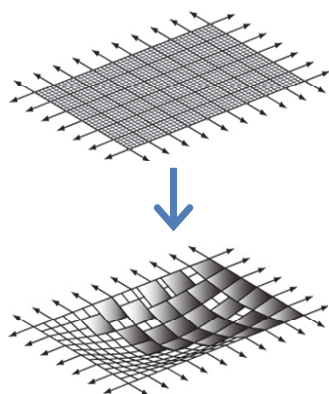



図3.1.2.2　落下防止ネットの概念　　図 3.1.2.3　ネットや補強ケーブルの梁間方向イメージ

(1) 一方向ケーブルの力学

落下防止ネットの目的は、損傷によって発生する落下物の重量を支え、利用者の活動領域に達するのを防ぐことである。従って、ネットの強度は予想される落下物重量と許容されるたわみ量から決まる。また、予想される危険な落下物の大きさから、ネットの格子サイズが決まる。さらに補強ケーブルの端部定着部は支えるべき落下物の重量と、ケーブルの初期張力に耐えるように設計する必要がある。従って、大空間内の落下防止ネットは、補強ケーブルに要求される力学的性能をもつケーブル構造として設計する必要が出てくる。

天井が全面にわたって落下する場合を最も不利な場合と考えると、ケーブルが受ける荷重は等分布荷重に近くなると予想される。等分布荷重 p を受けるケーブルのつり合い状態として次の近似式がよく知られている。

形状：$$y = w\left[1-\left(\frac{2x}{l}\right)^2\right] \qquad (3.1.2.2)$$

端部鉛直反力：$V = \dfrac{pl}{2}$，　端部水平反力：$H = \dfrac{pl^2}{8w}$　　(3.1.2.3)

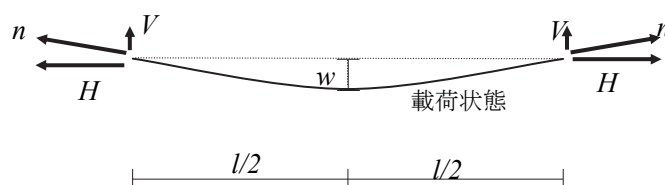



図 3.1.2.4　等分布荷重 p を受けるスパン l のケーブル

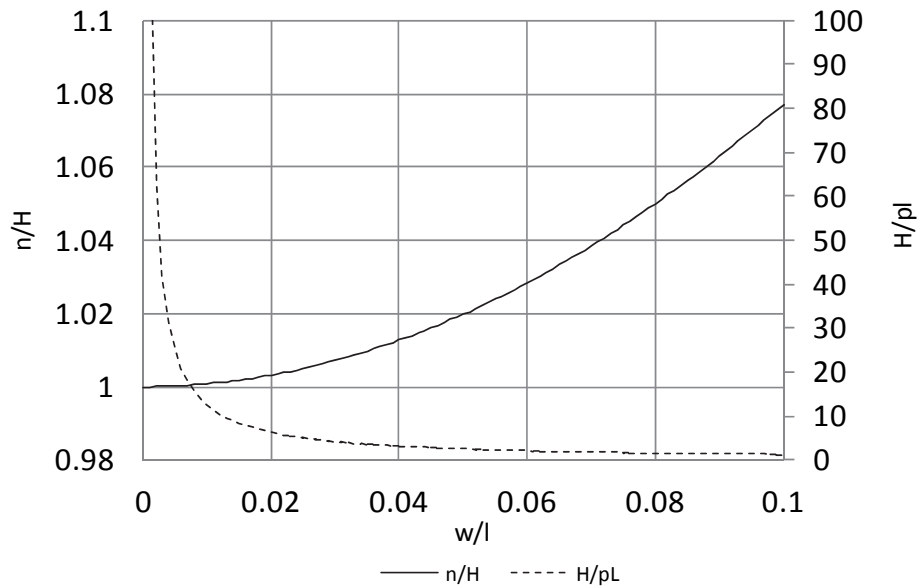



図 3.1.2.5　等分布荷重 p を受けるスパン L のケーブルにおける
w/L と $H/(pL)$及び n/H の関係

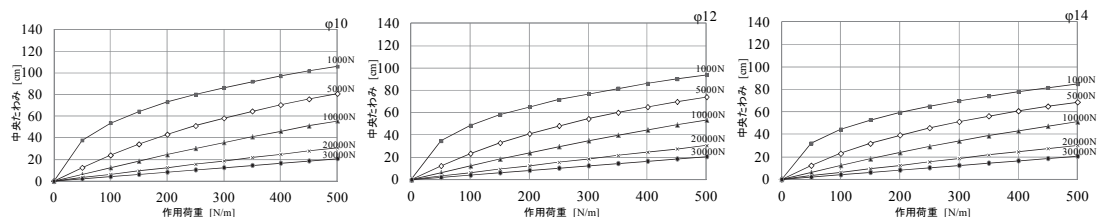
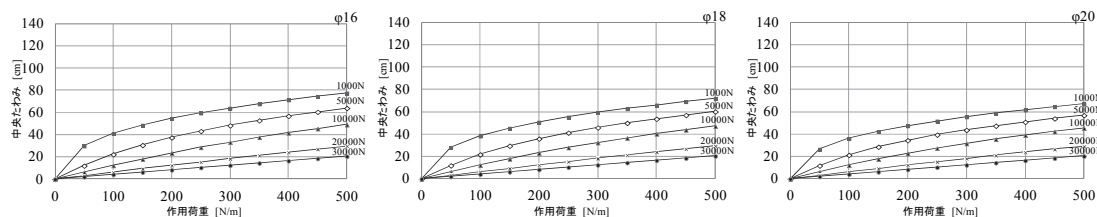
端部軸力：
$$n=\sqrt{H^2+V^2}=H\sqrt{1+16\left(\frac{w}{l}\right)^2} \quad (3.1.2.4)$$

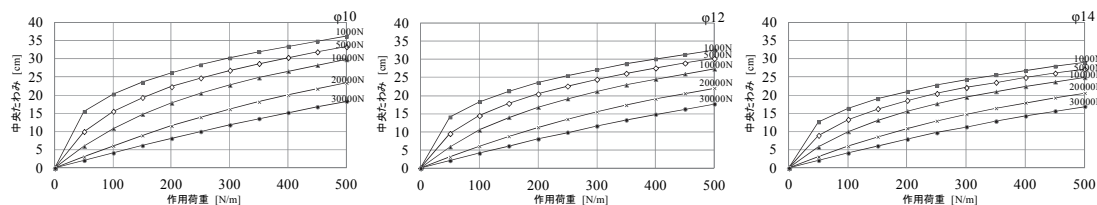
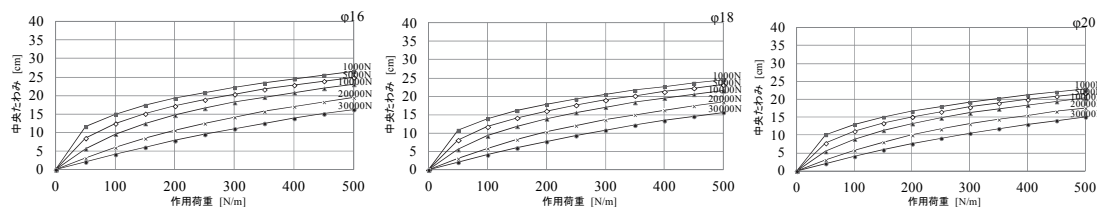
釣り合い形状 w/l と H/pl 及び n/H の関係を図示すると図 3.1.2.5 のようになる。これらの関係より、ケーブルスパン l と単位長さ当たりの荷重 p、及びたわみ w を与えれば、水平方向の反力及び軸力を求めることができる。

以上の関係は、たわみ w を含めた最終的なつり合い形状がわかっている場合に用いることができるが、実際は荷重が加わることによりケーブルが伸び、その分、さらにたわみ w が増える。このようなケーブルの伸びを考慮したつり合いの近似式として次式がある。

$$\frac{l}{8w}\sqrt{1+16\left(\frac{w}{l}\right)^2}=\frac{EA}{pl}\frac{8}{3}\left(\frac{w}{l}\right)^2+\frac{h_0}{pl} \quad (3.1.2.5)$$

ここに、E はケーブルのヤング係数、A は断面積、h_0 はケーブル初期張力である。

これらの関係を $l=10$m とおいて、ナイロンロープ(E=2,300 N/mm^2)と、ワイヤロープ(E=97,110 N/mm^2)を用いた場合のそれぞれに関して初期張力とたわみ、及び軸力の関係図を描くと図 3.1.2.6, 3.1.2.7 のようになる。

(a1) A=50.3 mm^2　(a2) A=78.5 mm^2　(a3) A=153.9 mm^2

(a4) A=201.1 mm^2　(a5) A=254.5 mm^2　(a6) A=314.2 mm^2

(a) ナイロン 66 ロープ(E=2,300 N/mm^2)を用いた場合

(b1) A=48.7 mm^2　(b2) A=67.3 mm^2　(b3) A=95.5 mm^2

(b4) A=125 mm^2　(b5) A=158 mm^2　(b6) A=195 mm^2

(b) ワイヤロープ(構造用ストランド 7*7, E=97,110 N/mm^2)を用いた場合

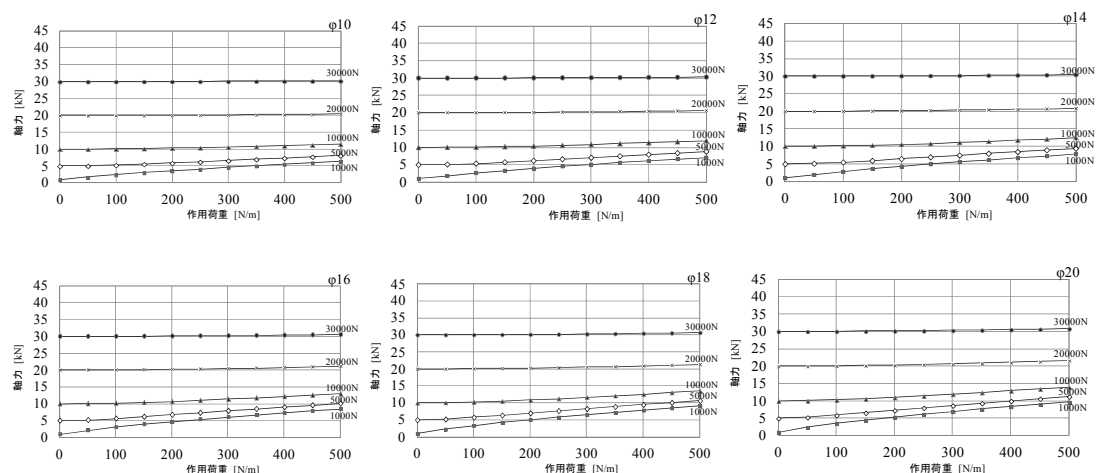
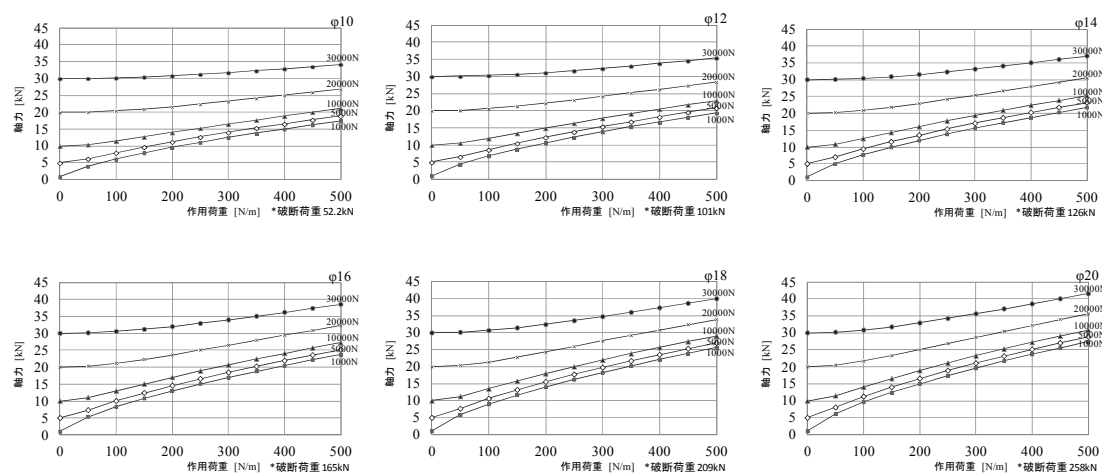
図 3.1.2.6　単位長さ当たりの負担荷重 p と中央たわみ w の関係

(a) ナイロン 66 ロープ(E=2,300 N/mm^2)を用いた場合

(b) ワイヤロープ(構造用ストランド 7*7, E=97,110 N/mm^2)を用いた場合

図 3.1.2.7 単位長さ当たりの負担荷重 p とロープに発生する軸力 σ の関係
(ロープ径 ϕ に対応する断面積は同径の中実な円形と仮定している)

同径のロープ同士を比較すると、初期張力が小さい場合、同じ荷重の大きさでは、より柔かいナイロンロープがたわみ量が顕著に表れる。しかし、初期張力レベルを上げていくと、たわみ量の差異は、小さくなる。ロープに発生する軸力を比較すると、柔らかいナイロンロープの方が軸力の変化が小さい。逆に硬いワイヤロープはたわみが少ない分、軸力レベルが上がる。初期張力レベルを上げていくと、軸力変化は若干少なくなる。これらの軸力は端部反力として既存構造にかかることになる。柔らかくたわみが大きい方が力学的には有利であることが解る。

(2) ネットの力学

落下防止ネットを構成する目の細かいネットやメッシュは落下物を直接受け止め、荷重を補強ケーブルへ伝える役割を果たす。天井面積が十分小さい場合は、１つの連続したネットだけで天井の荷重を受け、補強ケーブルは周辺のみに配置されてネットの荷重を集めて周辺構造体へ伝えるという構成の場合もある。

自重を受ける矩形の等長力膜の近似式として、次式が知られている。この式により、落下物を支えるネットの単位長さ当りの張力を概算することができる。

$$\frac{N}{ap}=\frac{16}{\pi^3}\frac{a}{w}\sum_{n=1,3,5,\cdots}^{\infty}\frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^3}\left[1-\frac{\cosh(n\pi y/2a)}{\cosh(n\pi b/2a)}\right]\cos\frac{n\pi x}{2a} \tag{3.1.2.6}$$

ネットの平面形状を正方形（$a=b$）とすると、上式は次式のように簡単になる

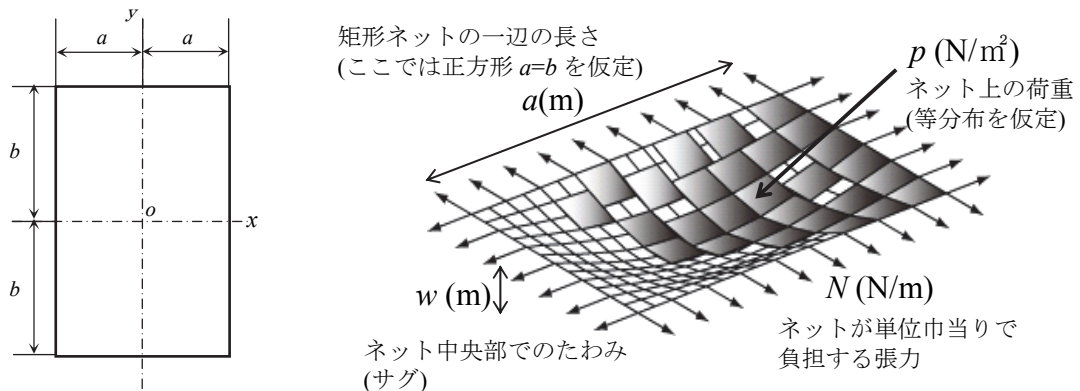
$$N=0.493\frac{pa^2}{w} \tag{3.1.2.7}$$

(a)矩形ネットの平面形状　　(b)矩形ネットの概形と各条件

図 3.1.2.8　矩形ネットの概形

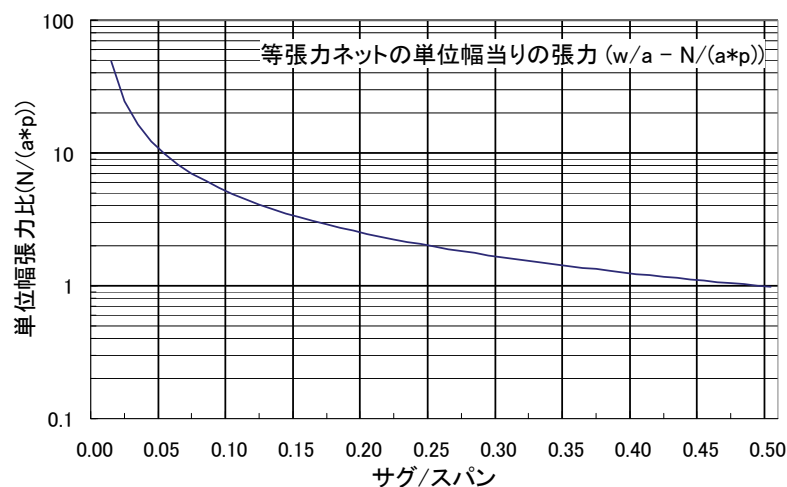



図 3.1.2.9　正方形等張力ネットのサグ･スパン比と単位幅張力比の関係

表 3.1.2.2　正方形ネットに発生する単位幅当りの張力（$p = 100$N/㎡の時)

w(m) | a(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
0.1	123	493	1110	1970	4433	7881	12314
0.3	41.0	164	369	657	1478	2627	4104
0.5	24.6	98.5	222	394	887	1576	2463
1.0	12.3	49.3	111	197	443	788	1231

等分布荷重をうける正方形ネットに発生する単位幅当りの張力 N を w/l と $N/(ap)$ の形に無次元化して表すと、図 3.1.2.9 のようになる。p=100N/㎡とおいて、実際の値として計算すると表 3.1.2.2 のようになる。式(3.1.2.6)から明らかなように、N は p に対して比例、a に対して 2 次、w に対して反比例の関係となる。

平面形が長方形のネットの場合、同一面積で同一サグの正方形ネットと考えて張力 N を計算すれば安全側の評価となる。

(3) その他の注意事項

落下防止ネット等のフェイルセーフは、既存建物における安全措置として採用される場合が多く考えられる。この様な場合には、落下防止ネット等が受ける荷重を既存の構造躯体へしっかりと伝える必要が発生する。

伝えるべき荷重は、常時にかかっている初期張力と、想定される落下物が全て落下した時の荷重である。これらの荷重は上述の計算にも示したように、鉛直方向に作用している重力に比べて非常に大きくなる場合が多く、定着部分のディテールには十分注意する必要がある。例えば既存の鉄骨躯体に補強ケーブル等を定着する場合、図 3.1.2.10(a)に示すような単なる摩擦を用いた方法は、保持できる荷重が低いので注意する必要がある。例えば(b)に示すような詳細にするなど、非常時に期待された性能を発揮するために、定着部の設計施工には十分注意をしなくてはならない。

また、鉄筋コンクリートの構造躯体に対しては、あと施工アンカーなどが用いられることが多いと考えられるが、あと施工アンカーには極力せん断力を負担させ、引張りで用いることは避けるようにする、などの注意が必要である。

また、鋭利な部分を持った高所からの落下物を支える可能性がある場合には、これを受けるネットやメッシュの切り裂き等に対する強度も必要である。これに関しては、例えば労働基準法の保護帽の試験方法(参考文献)などを参考にすることができる。

以上、ここで紹介しているフェイルセーフの方法は、主にロープやケーブルを用いるものであり、これらの設計の詳細については、日本建築学会ケーブル構造設計指針・同解説などを参考にするとよい。

(a)抜けやすく支持耐力が低い例　　　(b)より支持耐力の高いクランプの利用例

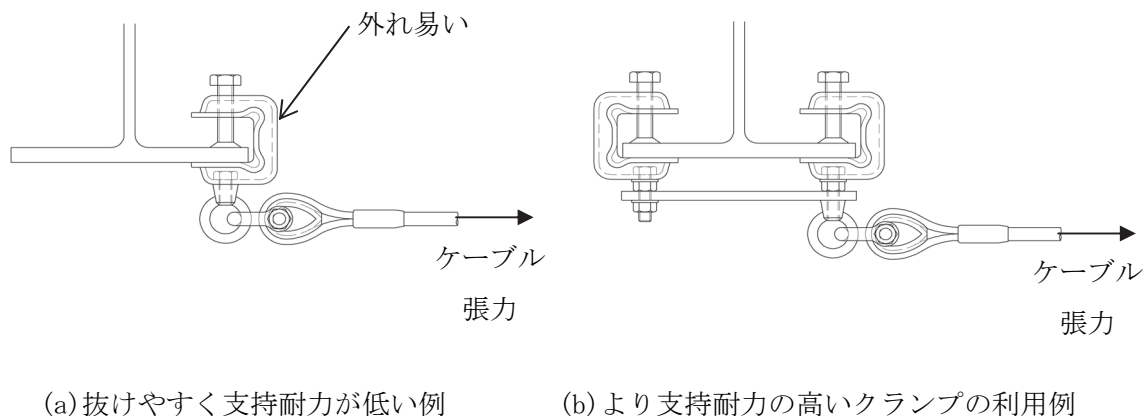



図 3.1.2.10　既存鉄骨躯体への定着の例

一般に、落下防止ネットは意匠性が低いと考えられている場合が多い。今後は、より意匠性の改良された設計例や素材の提案が望まれる。落下防止ネットが既存の天井のデザイン的な刷新と人命保護確保の双方に役立つように活用されればその意味は大きい。

一方、落下防止ワイヤは、天井裏側に設置される場合が多いので、既存の天井のデザインを損なうことなく人命保護を確保することが可能である。但し、図 3.1.2.1(b)の例でも野縁までしか落下防止ができていないように、連続面の天井板そのものの落下防止を有効に行うのにはディテールに工夫が必要となる。一般に「ワイヤメッシュ」とよばれる金属網状の重量天井があり、落下事故を生じると大きな危険を生じる。このような天井材のフェイルセーフには、網状部分に落下防止ワイヤが容易に取り付けられるため、適していると考えられる。

図 3.1.2.11　ワイヤメッシュの落下事故例

参考文献

1)　1978 年伊豆半島近海地震災害調査報告日本建築学会 1980 年.

2)　1982 年浦賀沖地震災害調査報告　日本建築学会 1984 年.

3)　1994 年北海道東方沖地震災害調査報告, 1994 年三陸はるか沖地震災害調査報告，日本

建築学会 1996 年.

4) 阪神・淡路大震災調査報告　建築編－3　シェル・空間構造　日本建築学会他　丸善, 1997 年.

5) 2000 年鳥取県西部地震災害調査報告, 2001 年芸予地震災害調査報告　日本建築学会 2001 年

6) 国土交通省「芸予地震被害調査報告の送付について(技術的助言)」国住 357 号平成 13 年 6 月 1 日. 7)国土交通省「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について（技術的助言)」 国住指 2402 号平成 15 年 10 月 15 日.

8) 国土交通省「地震時における天井の崩落対策の徹底について(技術的助言)」国住指第 1427 号平成 17 年 8 月 26 日.

9) 地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討中間報告, 一般社団 法人 建築性能基準推進協会

10) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 日本建築学会 1985 年 11 月及び 2003 年 1 月.

11) 非構造部材(屋根、外壁、天井)の地震･風による被害の軽減化の研究　特別研究 39　日本建築学会 2008 年 3 月.

12) ケーブル構造設計指針・同解説, 日本建築学会.

13) 小澤, 川口”非構造材落下防止ネットの力学と形状に関する基礎的考察”, 構造工学論文集, Vol. 56B, pp. 517-520, 日本建築学会, 2010. 3.

14) 日本膜構造協会「膜天井ガイドライン」 2013. 2.

3.1.3　準構造

質量の大きな天井が必要な場合，天井に期待する機能を「仕上げ材」の延長で処理せず、「構造」として設計施工し、安全に実現する。

本ガイドラインでは，建物を支えるという構造本来の目的ではなく，例えば音響性能という別の機能を発揮する為に使われる「構造」で，使用材料及び設計から施工まで「構造」として実現されるものを「準構造」と呼んでいる。目的が主たる構造とは異なるので「準構造」と呼ぶが，使用材料の管理，構造設計，構造計算そして構造部材としての施工・監理がなされる立派な「構造部材」である。

劇場やホール等，質量の大きな天井がどうしても必要な場合に，天井に期待する機能を「仕上げ材」の延長で処理せずに「構造」として設計･施工することで安全に実現するという考え方である。構造部材として設計施工されるが，主たる構造部材ではないので，本ガイドラインでは「準構造」と呼ぶ事とする。「準優勝」という言葉の「準」の様に、「構造」の次くらいに強ければ良い、という意味ではない。

高所設置の仕上げ材は，人命保護の確保が最優先であり，材料そのものに軽量柔軟なものを用いることが望ましいが，様々な理由で軽量柔軟な材料が利用できない場合がある。典型的な例として劇場やコンサートホール，映画館等の場合，音響性能上の要求から質量の大きな天井や仕上げ材を高所に設置したいという強いニーズが発生する。このような場合には，落下防止ネットの設置が 1 つの有効な落下制御法である。しかし，天井仕上げ材の重量が落下防止ネットで支持することのできない大きさとなる場合もあり，その場合にはもはや仕上げ材の工法の延長線で天井を支持することは適当ではない。仕上げ材による天井に全てを要求することを止め，設計の初期段階から音響制御という機能を実現するための構造材として重量面を考えることが必要である。ここで構造材として設計施工される部材は，建物重量を支えるのではなく，音響制御材としての機能を実現する構造となるので「準構造」と呼ぶべきであろう。「準構造」の実現のためには、音響制御の為の重量面材とそれを支持する構造体を設計の初期段階から構造設計に組み込み，構造躯体として設計施工する必要がある。重量面材を仕上げ材のように吊ったりビス止めをしたりするような工法を用いないで，PC 板や GRC 版などで作られた構造材そのものを音響制御用面材として利用することを考える。

さらに美観上の仕上げ材が必要であれば，準構造の下に軽量柔軟な仕上げ材を設置することを検討する。機能を実現する構造体としての「準構造」の発想は，設計の段階から構造材として設計施工された大型の「ぶどう棚」などで既に実現されているものもある。

既存施設で、重量天井がある施設の場合は、「人命保護」の実現のために，構造躯体にアンカーされた充分に強いケーブルとネットを組み合わせた，堅固な落下防止ネットや落下防止ワイヤで落下制御を行う必要がある。

図 3.1.3.1 に建築物の建設過程における構造材と非構造材及び天井落下事故の関係を，図 3.1.3.2 に重量天井における準構造の考え方を示す。図 3.1.3.2 にあるように，準構造は当所より構造材として設計施工する事で，人命保護と天井の機能を確実に実現する。

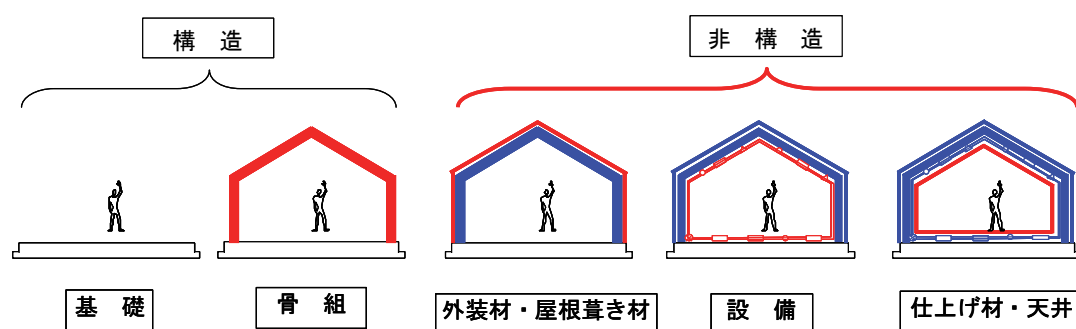
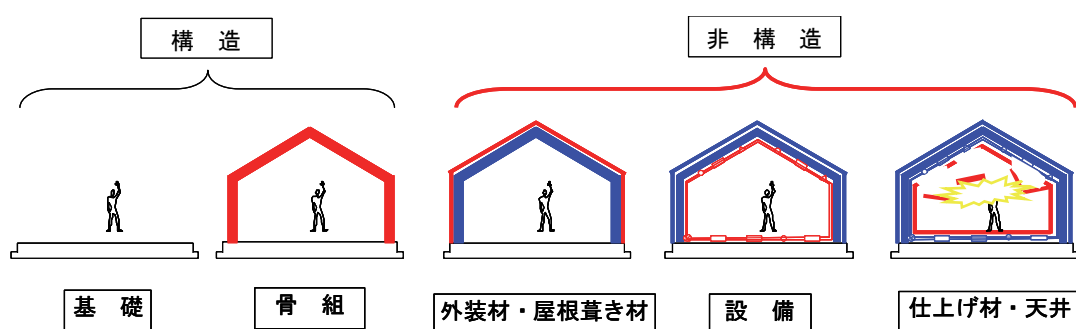
劇場やコンサートホール等の音響天井のように質量の大きな天井が必要な場合は，これを仕上げ材の質量に頼ることなく，PC 板や GRC 版などの構造材を用いて，構造として安全に実現することが必要である。このような天井の設計には構造技術者と音響技術者が深く関わることとなる。現状では音響技術者側に、構造材で作られた天井の音響性能に関する知見が乏しいため，実現上の困難が予想される。安全でかつ音響性能の高い天井の実現のためには，構造技術者と音響技術者が協働し，準構造による音響天井の性能に関する知見を蓄積していくことが重要となる。

(a) 建築物の建設過程における構造材と非構造材

(b) 天井の落下事故

図 3.1.3.1　建築物の建設過程における構造材と非構造材及び天井落下事故

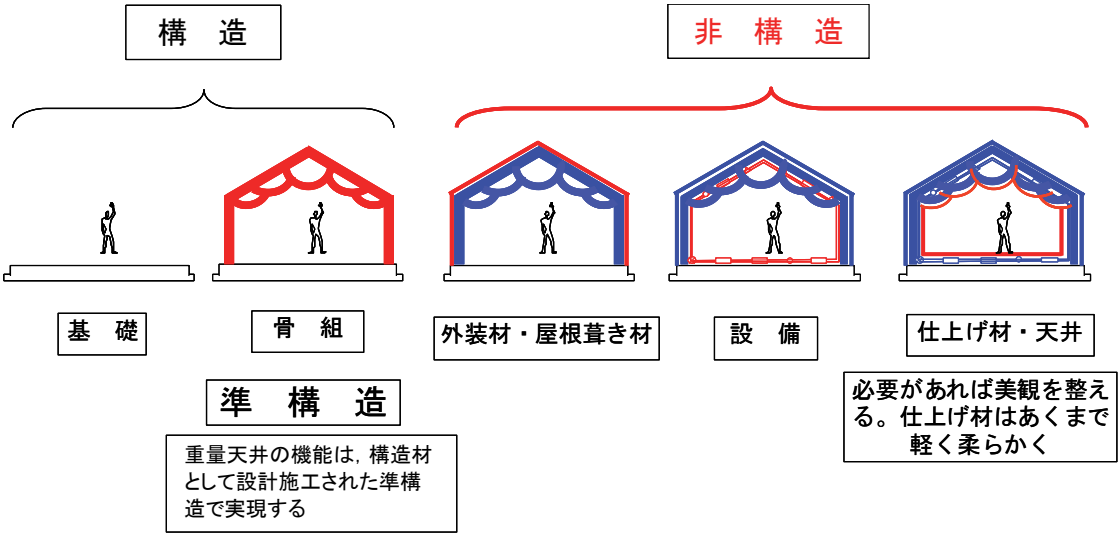



図 3.1.3.2　重量天井における準構造の考え方

3.1.4　直天井化、軽量柔軟化の留意点

人命保護に適した各工法（直天井化、軽量柔軟化）の特性を理解し、積極的に採用する。

1．性能、機能上の特性と工夫

人命保護に適した工法と従来の天井工法（軽量鉄骨下地にボード張り等）を比較すると、性能、機能面の一部に差異が見られる。天井に求められる性能、機能の詳細は、後段の「3.2.1 天井と機能維持」他にも示されているので参照されたい。

大きく二つの工法を概観すると、表 3.1.4.1 や表 3.2.1.1 のように整理される。人命保護を確実に実現する点で、二工法のメリットは非常に大きい。

一方、一部の性能、機能については、工法を適用出来る施設用途が限定される場合がある。しかし、大半の性能、機能については工法の特性を生かし、構造や設備を含めた工夫を行うことにより、同等かそれ以上の性能を得ることも可能である。

例えば、直天井化で構造体や設備システムを積極的に見せた事例では、デザイン的にも機能的にも新規性、先進性をもったものが多い。そして、それを実現する過程で構造体の納まりや設備の吊り方等を工夫することが、それらの落下制御を積極的に行うきっかけにもなりうる。天井、設備、サイン等、頭上にある全ての物の落下制御が出来てこそ、初めて人命保護が達成できる。尚、夫々の工法に於ける特性や性能に関する工夫については「第4章　事例紹介」でも示している。

人命保護としてのメリットを活かして、積極的な採用を推進する。

表 3.1.4.1　人命保護工法に於ける天井の性能、機能

工　法	直天井化	軽量柔軟化
人命保護	・天井材としての落下物が無い	・軽量柔軟により落下の可能性が極めて低い ・万が一落下しても人命への被害がない （安全性評価法より）
性能、機能	・音響性能： 音楽ホール等では形状、吸音、反射等への対応が困難 一般用途では同等 ・視覚関連の性能、デザイン性： 同等、或いは工法ならではの新規性、先進性あり（例：構造体や設備システム等を見せるデザイン） ・空調/空気質の性能： VOC 対策、防塵等が重要な用途には不向き 一般用途では工夫次第で同等、以上も可能 ・火災性能： 蓄煙、検証法等、有利な面あり	・音響性能： 音楽ホール等では形状、吸音、反射等への対応が困難 一般用途では同等 ・視覚関連の性能、デザイン性： 同等、或いは工法ならではの新規性、先進性あり（例：膜天井による光の演出） ・空調/空気質の性能： 生産施設等を除き、同等 ・火災性能： 同等

2. 特定用途・部位に関する留意点

特定の用途・部位に使用する天井については、非常時、平時の夫々において天井それ自身や周辺部位の性能低下等に留意が必要な場合がある。これらは従来の天井工法でも、本報告書中の様々な工法でも基本的には同じである。但し、対策方法は工法によって異なる場合もある。ここでは、在来工法、直天井化、軽量柔軟化を採用する場合に留意すべき項目を表 3.1.4.2 に示す。

表 3.1.4.2　人命保護工法の適用部位と留意点

用途、部位	問題点	在来工法	直天井化	軽量柔軟化
プール、浴室等	・高温多湿→結露、発錆、仕上げ材の強度低下、カビ ・塩素→発錆	・気密確保 ・断熱 ・加圧、又は天井内換気 ・防カビ仕様 ・防錆材、又は防錆塗装 ・電蝕対策	・断熱 ・防錆材、又は防錆塗装 ・電蝕対策	・気密確保　・断熱 ・加圧、又は天井内換気 ・防カビ仕様 ・防錆材、又は防錆塗装 ・電蝕対策
商業施設等不特定多数の利用施設	・吊り物、サイン等の揺れ→パニックを誘因	・重量物：落下防止と振れ留め ・軽量物：振れ止め	・同左～対象物は増加	・同左
軒天 半外部空間	・風圧（正圧、負圧） ・風雨による吸水、劣化 ・塩害、大気汚染	・下地：耐風圧仕様 ・低吸水性の仕上材 ・耐塩仕様 ・耐汚染仕様 ・電蝕対策	露出部位の構造体、仕上材、設備： ・断熱 ・耐風圧、飛散防止 ・耐塩　・耐汚染 ・電蝕対策	・下地：耐風圧仕様 ・低吸水性の仕上材 ・耐塩仕様 ・耐汚染仕様 ・電蝕対策
交通施設（駅舎等）	・列車等通過時の振動、風圧変動	・下地：耐風圧仕様	露出仕上げ材： ・飛散防止	・下地：耐風圧仕様

上記は一例であるが、地震等の非常時以外での問題点が大半である。平時の様々な使用条件、環境をきちんと評価して仕様を決定することが重要である。

3.2　機能維持

人命保護を確保した上で、必要に応じて機能維持を実現する。

建築空間の性能として平時、非常時に関わらず、構造躯体が倒壊に至るまでは「人命保護」は絶対に実現されるべき最低限の性能として要求される。しかし、建築空間にはさらに、用途に応じて、居住性、快適性、生産性等といった様々な付加的な機能が求められる。即ち、「人命保護」を実現した上で、さらなる要求として「機能維持」がある。

機能維持の要求は、建築空間の用途と発注者側の要求によってさまざまに異なる。平時の機能実現に加え、災害時の「機能維持」が要求される場合は、「どのような外乱のどのようなレベルに対して、どのような機能を維持するか」という個別の問題が生じ、この点は発注者と設計者、施工者等の間で十分に合意形成をし、実際の性能として実現していく必要がある。

防災上の重要拠点での機能維持や、避難所としての機能維持、企業の事業継続性上の機能維持など、さまざまな種類の機能維持要求がある。また、通常の建物でも避難径路では災害時にも通行上支障を生じてはならない、という空間としての機能維持が重要である。

機能維持を要求する場合は、想定されるさまざまな外乱に対して損傷制御を行うことが有効であり、代表的な損傷制御として、地震外力を想定した耐震補強などがある。また、屋内プールの天井等では湿気や塩素による劣化損傷を防ぐための損傷制御が要求される。

いずれの場合も、機能保持が検討される以前に、人命保護(落下制御)は確実に実現されていなければならない。

3.2.1　天井と機能維持

天井の実現する機能を適切に把握すると同時に、その損傷等が当該施設や空間の機能維持に与える影響について予測し、要求される機能維持達成のための計画を行う。

天井は室内における天空に近い認識となる傾向があり、そこにどんな機能があるのかが意識されにくい。以下では、天井面の存在によって保たれている機能についてあらためて整理を試みる。このことは天井の軽量・柔軟化や直天井化を行う場合、これらの機能をどのような形で実現していくか検討する場合にも必要である。

1. 天井に求められる様々な機能に関する整理

天井は一様な面として構成されていることが多いため天空に近い認識となり、視界に入っている割に意識されにくい存在でもある。また、天井裏に設置されている設備機器やダクト、大梁、小梁等を覆い隠しこれらの存在を気づかせない役割も果たしている。

天井は音、明るさ、室内空気質、避難安全性、室内気候など多くの空間居住性能と関連がある。これらは

・特定の性能を実現するために必要なもの（音響性能、高度な空気環境など）

・室内空間に期待されている機能を実現するためのもの（視覚、空調など）

・火災時における火災の感知や煙の流動を制御するためのもの（火災）

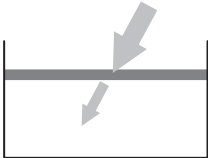
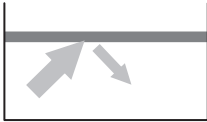
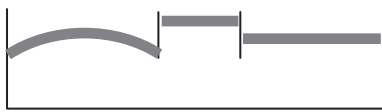
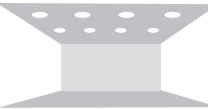
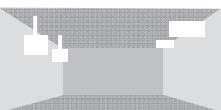
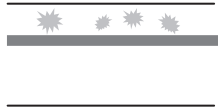
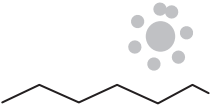
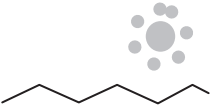
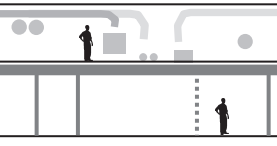
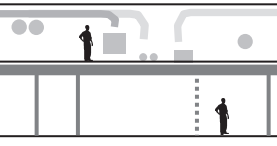
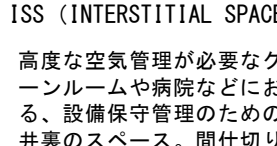
に大きく分類することができる（表 3.2.1.1）。

音関連では、遮音、吸音、反射等で天井面に大きな役割が期待される。音響性能が重要である施設において、天井が性能面に果たす役割は大きく、また、音楽ホールなどでは施設の性格上、天井の意匠も重要になる。

視覚や空調など室内環境を整える天井の機能については、天井面そのものが果たしている役割と、天井面は室内居住域と天井裏の界面として存在し、むしろ天井裏の設備や機能の方に重きがある場合もある。

火災に関する天井の機能は、室内で火災が発生した場合の非常事態のみに期待されるものである。また法令による規定が多く存在する。

2. 天井の機能と柔軟軽量化

天井の機能を念頭に置いたうえで、

・直天井化は可能か

・軽量化もしくは柔軟化は可能か

について検討したのが、表 3.2.1.1 の右側の 2 列である。一部、音響性能を除けば、何らかの工夫により機能を実現できることが多いことが見て取れる。

こうした思考実験を行うことで、天井と機能維持との関係がより明解になる。

表 3.2.1.1　天井に求められる様々な性能、機能

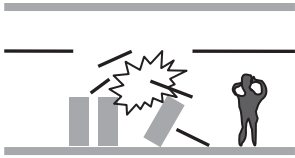
分類				求められる性能や役割	軽量化可能性	直天井化の可能性
音		遮音		・屋根、上階からの音侵入防止（外部騒音、雨音など）。 ・遮音には天井の重量が必要。	△ 屋根ｽﾗﾌﾞで代替	△
		吸音		・吸音性に大きく関係、音声明瞭度、話しやすさに影響。 ・映画館等、電子音響の場合は吸音も重要である。 ・音響が重要な施設では天井の寄与は相当大きい。 ・音の反射には天井の重量と複雑な形状が寄与。 ・視覚障害者は室内の反射音でかなり正確に空間認知が可能。	× 天井材の質量への依存が大	×
		反射	反射音、残響音 スピーチプライバシー 空間認知			
		音響機器		・スピーカー等の保持。	○	△
空間を整える	視覚	照明	照明器具の保持	・照明による光の分布に寄与。	○	○
			昼光利用	・窓・天窓からの採光は天井面の反射を前提。	○	×
			明るさ感	・天井面は背景として、反射面として明るさの感覚に寄与。	○	×
		サインなど		・サインの保持やワイヤーメッシュ天井からの吊り下げ。 ・サインの見やすさに寄与。	○	△
		映像、舞台		・映像スクリーンの機能も。 ・舞台やスクリーンを整える ・ピクチャーレール	○	△
		安心感、空間のグレード感		・設備機器類やダクト、配管等を隠蔽、頭上空間の見た目の安心感に寄与。（見た目が安全なので却って危ないとも言える） ・圧迫感や開放感、また空間のグレードと深く関わる。	○	△
	空気	空調	冷暖房、換気	・空調機器の保持。 ・天井チャンバーなど。 ・天井形状は気流の誘導に関わる。	○	○
			適切な空調ボリューム	・室内の気積を天井の高さで制御	○	△
		室内空気質		・VOC 等。 ・汚染物質の封じ込め	○	△
		断熱・結露防止		・天井による断熱効果（最上階）。 ・天井形状の工夫で結露水の誘導や落下防止（プール、浴場等）。	○	△
		清潔・防塵		・天井があることで、耐火被覆材や塵芥類の落下を防止。 ・厨房等では天井は衛生面から必要。	○	×
		高度な空気管理		・温湿度の制御 ・ISS（INTERSTITIAL SPACE）等	△	×
火災		防災機器の保持	感知器、スプリンクラー 非常照明、誘導灯	・天井が無くても別の方法で設置は出来る。スプリンクラーなどは設置位置によっては機器の性能を上げる必要がある。	○	△
		煙制御	排煙口の保持 排煙ダクト 防煙垂壁等	・天井面を煙溜まりの界面としている。 ・天井面があることで防煙垂壁を設置しやすい面も。 ・天井チャンバー排煙は天井面の存在を前提。	○	△
			蓄煙機能	・天井が高いほど蓄煙や希釈の効果が発揮され、安全。天井が低い場合、煙が降下する時間は短く危険。 ・階避難安全性能等と天井の高さは大きく関係。	○	○
		不燃性能など（内装制限）		・屋根スラブにウレタン等の断熱材を施す場合、準不燃性能等が確保できない。準不燃などの天井を張ることで解決できる。 ・壁は難燃でも天井は準不燃以など、壁より厳しい要求。注1) ・重い不燃材は火災時に落下しやすく、消防活動に支障も。	△～× 軽量な不燃材料があれば○	○

遮音
吸音
反射（反射音，残響音）
天井の高さ、天井材、形状などは、反射音・反響音などを介して空間認知の手掛かりになる。視覚障害者の多くは鋭敏な感覚によりかなり正確に空間を把握できる。

照明器具の保持
サインなど
昼光利用
安心感，空間のグレード感
室内上部が暗ければ、天井材によって設備機器等を見えなくする必要性は低くなる

空調機器の保持
室内空気質、封じ込め
断熱・結露防止
ISS（INTERSTITIAL SPACE）
高度な空気管理が必要なクリーンルームや病院などにおける、設備保守管理のための天井裏のスペース。間仕切りの変更にも追従しやすい。

防災機器の保持、感知器
排煙ダクト・排煙口・防煙垂壁の保持器
蓄煙機能

3. 天井の損傷・落下による機能維持への影響

天井の損傷・落下等によって機能維持に支障をきたすことについては概ね以下のように3つに分類できる（表3.2.1.2）。

まず、天井落下により、室内の重要な設備や備品その他に損傷を与えるケースが考えられる。障害や破損に加えて塵芥等による汚染なども含まれ、小規模の落下でも、電算機や通信設備、重要なファシリティへのダメージの度合いによっては、その室や施設全体さらに施設外の広域に至るまで機能維持に影響を与える場合がある。倉庫や生産設備のある室などは非居室であり直接人命への脅威は少ないが、保管されているものや生産設備に対する損傷は機能維持に大きな影響を与える。病院の手術室や集中治療室などでは、施術や生命維持装置などの重要ファシリティへの損傷が、患者の生命に影響を与えることもある（ファシリティへの損傷）。

次に、落下した天井材や設備機器が室内の使い勝手に支障となるケースがある。足の踏み場がなく、それらの除去が困難であり、業務等を継続することが困難になるなどである。大規模な落下や損傷崩落が発生した場合はこのようになる場合も多い。また、廊下やエントランスでの天井の落下・飛散は避難する者への脅威となるばかりでなく、救助・救命活動を妨げることになる（空間の使用上の困難）。

また、天井が存在することで保持されていた性能や機能が失われ、室空間の性能・機能が大幅に低下もしくは喪失するケースがある。音楽ホールなどでの音響性能や、業務ビルなどで各種設備の損傷が業務遂行を困難にするといったことも含まれる（機能の喪失）。
以上、３つに分類したが、実際はこれらが複合して機能維持に大きなダメージを与えることが多いと考えられる。

表 3.2.1.2　天井の損傷・落下と機能維持への支障

ファシリティへの損傷	空間が使用不可能	重要機能の喪失
落下物によって、室内の重要な設備や備品その他（ファシリティ）に危害を与えることで、機能が失われる。	足の踏み場もない状態になって、作業空間、接客空間スペースとして機能しない。	天井があることによって成立していた機能や性能が失われる。
・小規模の落下でも、重要なファシリティへのダメージの度合いによっては、その室や施設全体さらに施設外に至るまで、機能維持に影響を与える。 ・スプリンクラーの損傷による放水で、水損事故や火災部分への放水量不足なども含まれる。 ・非居室で重要な機器類がある室などが多く該当する。	・小規模の落下では、空間の使用不可にまでは至ることは少ないが、天井の過半の落下や大規模な崩落では影響が大になる。 ・廊下、エントランス等で天井が崩落することで、施設内の主要な室や居室へのアプローチが阻害されることも含まれる	・音響性能 ・火災安全性能 ・高度な空気環境の維持 ・天井内の設備（空調ダクトや空調器、配管類など）や、天井によって保持されている設備（照明、吹き出し口など）が落下することも機能の喪失。 ・太陽光の入りにくい室で、照明設備の喪失は、機能維持を困難にする。
生産施設　インフラ施設 データセンター 駅施設　電算室　病院 アミューズメント施設 倉庫	事務室　生産施設 廊下　エントランス	音楽ホール クリーンルーム 照明がないと執務できない室

3.2.2　損傷制御としての耐震設計

損傷制御としての耐震設計とは、地震時の天井の損傷を制御することで建築空間としての機能を維持することを目的とする。

１．はじめに

3.11 東日本大震災では事業継続性の重要性が明らかとなった。地震時に人的な被害を免れたとしても地震後の社会活動あるいは企業活動が停止することは復旧という観点から避けなければならない。図 3.2.2.1 は地震発生前後における建物の機能の推移を示したものである。地震が発生すると、建物の損傷などにより機能は一時的に低下する。その後、損傷が徐々に回復するとともに建物の機能は元の状態に修復される。このとき、図中の三角で囲まれた部分が損失となる。この図から明らかなように、損失は脆弱性による一時的な機能低下の度合および回復能力によって決定される。このために事業継続性の観点によれば、損傷による建物機能の低下を如何に小さくするか、および回復能力を如何に高くするかが課題となる。

通常の構造物に対して健全性を検討する行為を行う場合について考えてみると、一般的に、設計外力の設定、設計外力による発生応力および変位などの算定、発生応力・変位などとその許容値との比較検討、という手順がとられる。これらは構造設計者の感覚からすれば当然のように思われるが、天井についてはこれまで非構造材という取扱いがなされてきたこともあり、設計者が健全性を検討するために必要となる上記の情報が不足しているのが現状である。このために、2003 年の釧路空港ターミナルビルあるいは 2005 年の仙台市にある屋内プールにおける大規模な天井崩落以来、構造的な観点からの多くの研究がなされてきている。さらに、3.11 の東日本大震災後には、国土交通省による平成 23 年度建築基準整備促進事業の一環として「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」（事業主体：一般社団法人建築性能基準推進協会、同検討委員会委員長：坂本功東京大学名誉教授）が実施され、天井の耐震設計に向けた報告がなされている [5)]。本節では、既往の研究を踏まえて天井の損傷制御としての耐震設計のあるべき姿について解説する。大きな流れを以下に示す。なお、本節では鋼製下地在来工法天井を主たる対象とする。

1．地震時に天井面に作用する慣性力については、建物の振動特性による増幅を考慮したものとする。このとき、水平方向のみではなく、必要に応じて鉛直方向についても考慮する。
2．天井に作用する地震時の慣性力は主として天井面に作用することから、この慣性力を構造躯体に伝達する機構を確保するとともに、その安全性を確認する。
3．設定した慣性力伝達機構における下地材間の接合部では破断や脱落が生じないようなディテールを採用する。
4．天井の振動特性には接合部の特性が大きく影響することから、想定される力など

に対する接合部要素実験を行い、破壊に至るまでの性状を把握する。なお、接触形式による接合形態では動的載荷によって緩みや脱落が発生することがあるために、動的繰返載荷実験とすることが望ましい。

5．採用する接合方式を適用した系としての天井実験を行い、要素実験結果から系としての特性が把握できることを確認する。

6．上記によって得られた慣性力に対して、対象とする天井システムが健全であることを検証する。

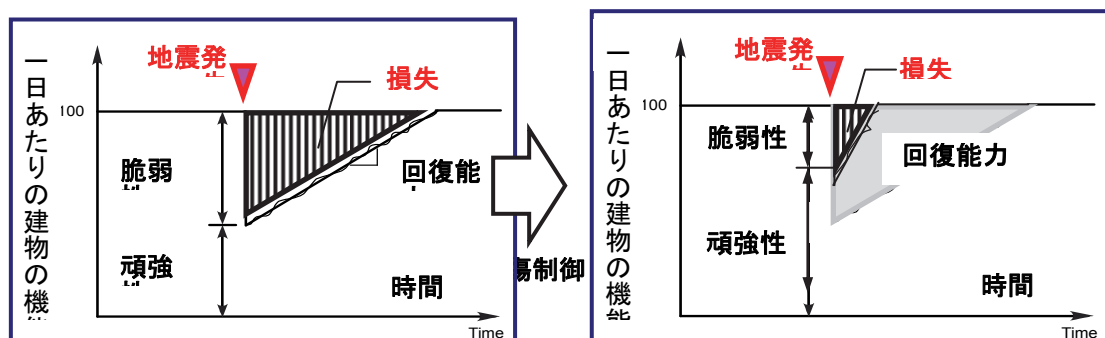



図 3.2.2.1　事業継続性に関する概念図

2. 慣性力の基本的考え方

天井面に作用する地震力の評価方法の概念図を図 3.2.2.2 に示す[5)]。この図は一層からなる建物の屋根から吊り下げられた天井の地震時の応答を示したものである。地震動が建物に入力されると建物の屋根レベルでの加速度は建物の振動特性（固有周期・減衰定数）に応じたフィルターを通した波形となる。この屋根（吊り下げられた部位）の加速度波形が天井の系に対する入力加速度となり、天井面の加速度は天井の振動特性に応じて決定される。

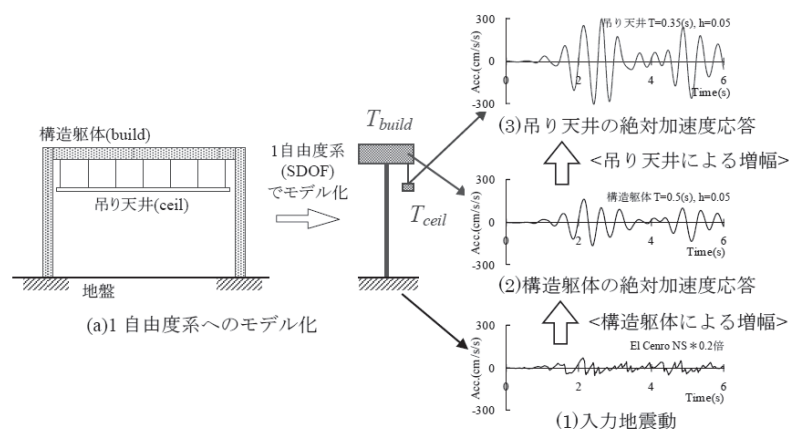



図 3.2.2.2　建物に付随する天井の地震時の応答

一般的に動的な外乱が作用した場合の「系（システム）」の応答は系の固有周期および減衰定数に依存する。系の応答の最大値と系の固有周期の関係を図化したものを応答スペクトルと呼ぶ。応答スペクトルを用いて建物および天井面の最大応答加速度を示したものが図 3.2.2.3 である。図中、S_a は所定の地震動を入力加速度とした場合の最大応答加速度を示している。また、S_{af} は床応答スペクトルと呼ばれるものであり、吊り位置の発生加速度を入力加速度とした場合の天井の固有周期に対する最大応答加速度を示している。S_{af} が求められれば、対象となる天井の固有周期を設定することで天井面に発生する加速度、さらには同加速度に天井の質量を乗ずることにより天井面に作用する慣性力（地震力）を算定することが可能となる。

床応答スペクトルの性質として、S_{af} は建物の固有周期近傍で最大値となること、および天井の固有周期がゼロに漸近すると吊り位置での発生加速度の最大値に等しくなること、が挙げられる。前者は建物と天井の固有周期が近い場合に共振効果によって天井面に作用する地震力は吊り位置の最大応答加速度に比し大きなものとなることを意味し、後者は天井の固有周期が短い場合（天井がしっかりと建物に取り付けられている場合）に天井面に作用する地震力は吊り位置の最大応答加速度に等しくなることを意味している。

以上のことを踏まえて、天井の設計用地震力（慣性力）は、建物の固有周期と建物の固有周期に近い場合あるいは天井の固有周期が短い場合を区別して、天井の設計用地震力を設定することとしている。

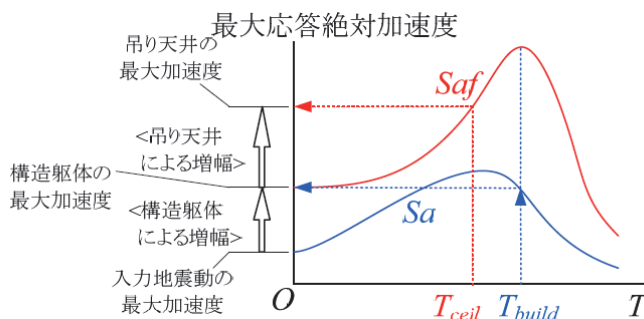
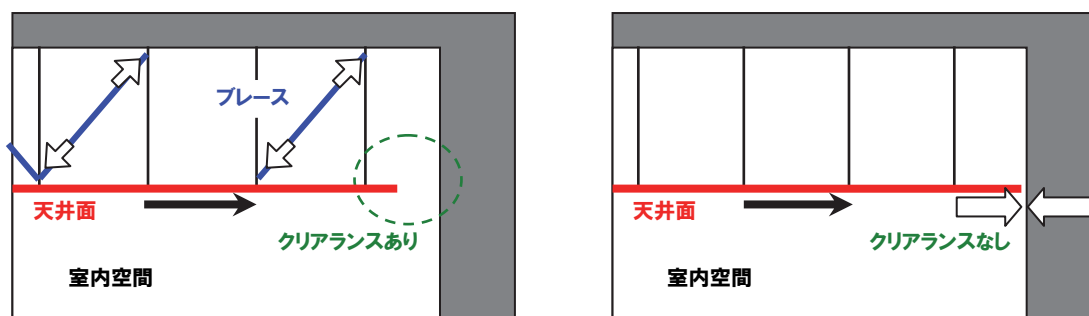



図 3.2.2.3　吊り位置と天井面の加速度応答スペクトル（文献 5 から引用）

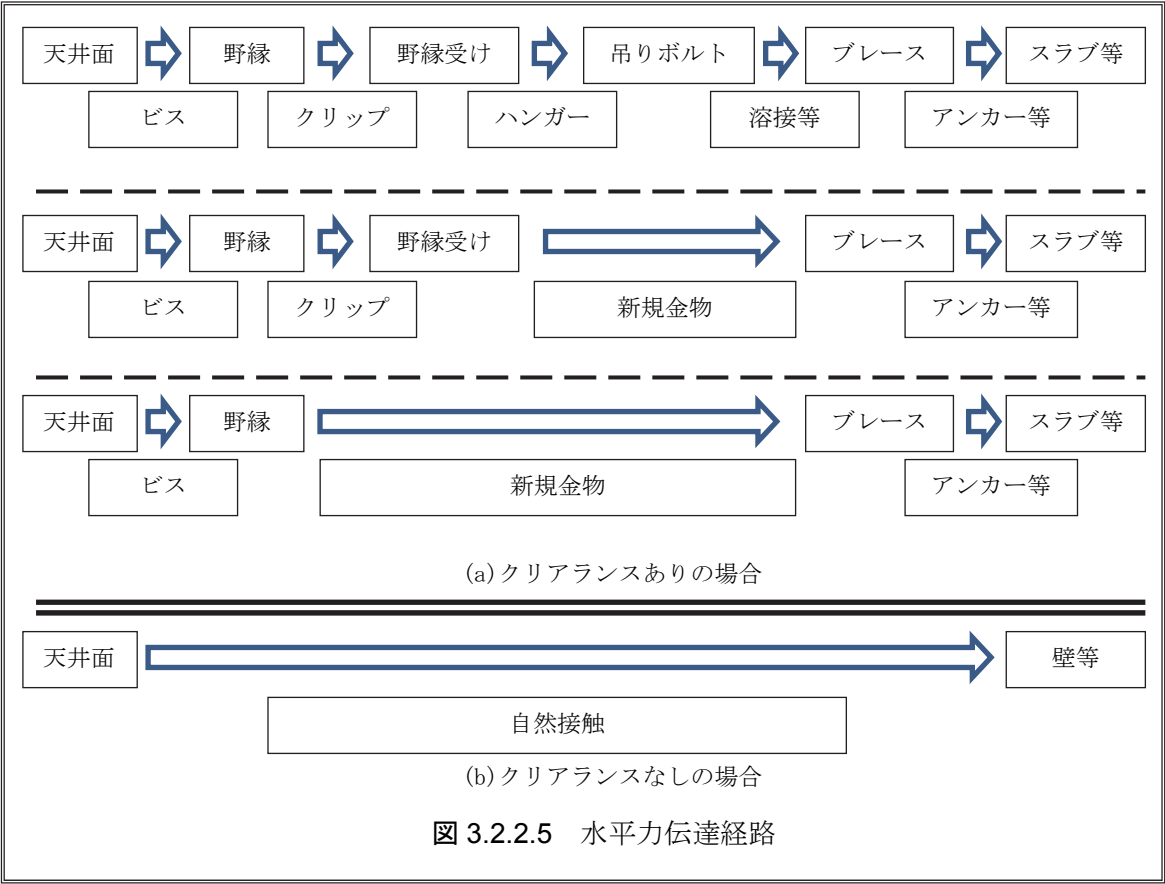
3. 慣性力伝達機構

天井の耐震性を考える上で、天井と周囲の壁などとのクリアランスの有無は大きな意味を有する。天井におけるほとんどの質量は天井面に分布しているために地震時の慣性力は天井面に作用する。このとき、クリアランスがない場合には慣性力は天井面から直接周囲の構造に伝達されるのに対して、クリアランスがある場合には天井面に作用する慣性力は吊りボルトや斜め振れ止めを介してスラブや屋根に伝達されることとなる。したがって、前者の場合には天井面ならびに周囲の構造の安定性が問題となり、後者の場合には伝達経路上の構成要素、すなわち、天井面、野縁、野縁受け、斜め振れ止め、吊りボルトおよびそれらの接続金物の安定性が問題となる。よくどちらの天井が安全かという質問を受けることがあるが、この質問はあまり意味がない。なぜならば、天井の安全性は、それぞれの設計思想に応じた力の伝達経路が確保されているか否かに大きく依存するためであり、伝達経路上のどこかに脆弱な部位が存在すれば、クリアランスの有無に関わらず耐震上危険な天井となることは言うまでもない。

(a)周辺とのクリアランスありの場

(b)周辺とのクリアランスなしの場

図 3.2.2.4　水平力伝達機構

クリアランスの有無による水平力伝達経路の一例を図 3.2.2.5 に示す。

図 3.2.2.5　水平力伝達経路

4. 接合部の基本的考え方

近年の地震時における天井の大規模な崩落現象は、鋼製下地材間を連結する接合金物の脱落あるいは接合部の破断によって生じている。一般的な柱梁部材においても接合部の損傷は回避すべき現象としており、この目的のために導入されている概念が柱梁の設計における保有耐力接合と呼ばれるものである。特に接合金物の脱落や溶接部の破断が生じると、関連する水平抵抗機構が消失し、天井全体としての終局耐力は、各機構の最大耐力の足し合わせとはならない。これを図化したものが図 3.2.2.6 である。２つのブレース構面から成る 2 種類の天井を考える。天井①における構面 A および構面 B は降伏耐力後耐力を維持する変形性能を有するのに対して、天井②における構面 C および構面 D は接合部の脱落等が発生することで最大耐力以後急激に耐力を失う性能を有する。このとき、天井①の最大耐力は構面 A および B の総和にて表されるが、天井②の最大耐力は各構面の総和とはならない。さらに、後者は各構面が連鎖的に損傷する危険性、すなわち、構面 C において脱落が発生したのち応力再配分によって一気に構面 D の負担力が増加することで構面 D においてもまた脱落が発生する、という可能性をも有している。したがって、接合金物の脱落は天井の耐震設計を考える上で回避すべき挙動であることは明らかである。それにも関わらず、不幸にして現状の多くの仕様の天井では接合部が最も脆弱な部位となっていることが深刻な被害を発生していると言うことができる。

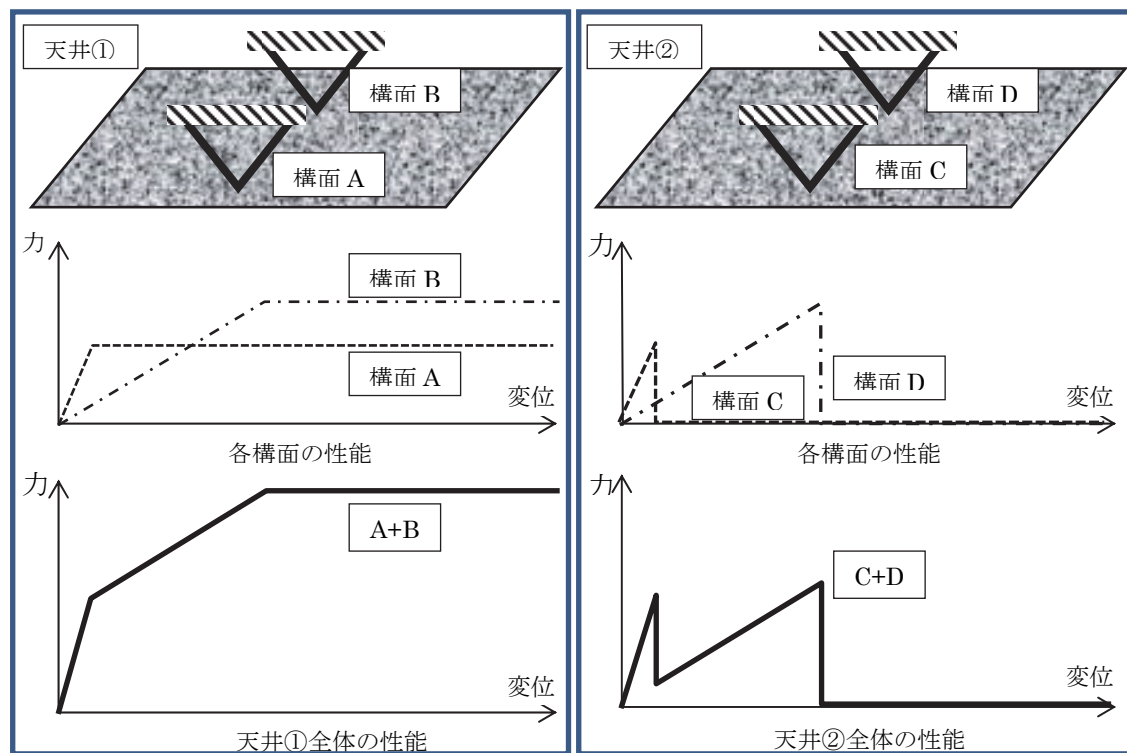



図 3.2.2.6　接合部の影響（概念図）

これまでの地震被害において確認された接合部の損傷を以下に示す。これらは天井損傷を生み出す根本的な原因（損傷の引き金）か否かは現状では必ずしも明らかとはなっていないが、最終的に実際に確認されている現象であり、上述した連鎖的な損傷の一部として認識することができ、これらの脱落が生じなければ天井の被害を最小限で抑えることができたかもしれない。

(a)吊りボルト定着金物の脱落

(b)ハンガー部の損傷

(c)斜め振れ止め溶接部の破断

(d)クリップの脱落

図 3.2.2.7　接合金物の損傷例

5. クリアランスがある場合の損傷制御法

(1) 接合部性能

クリアランスならびに斜め振れ止めを設ける慣性力伝達機構を採用した場合には、図 3.2.2.4(a)に示したように天井面に作用する地震時の慣性力が鋼製下地材を経路としてスラブなどに伝達される。このために経路上にある最も脆弱な部位に損傷が発生することとなる。現段階で、最も脆弱とされるのがクリップと呼ばれる野縁受けと野縁を接合するための金物である。このクリップによる接合部の力学的性状について検討した結果を示す。

JIS 規格を満足するクリップによる接合部を抽出した試験体の性能試験を行った（図 3.2.2.8）[1)]。図 3.2.2.9(a)は鉛直力を作用させた場合の鉛直力-鉛直変位関係、図 3.2.2.9(b)は水平力を作用させた場合の水平力-水平変位関係である。図 3.2.2.9(a)から、鉛直載荷の場合の脱落時耐力はおよそ 0.5kN であることが解る。この値は自重に対するクリップの負担荷重と比較すると、常時荷重に対してクリップは十分な安全性を有していると言える。ただし、注意しなければならない点は、図 3.2.2.9(b)に示すように水平載荷の場合にもクリップは脱落する可能性があるという点である。そのときの値は 0.3kN 程度となっている。つまり、地震による水平力の伝達過程でクリップに発生する応力が上記の耐力を超えたときにクリップは脱落に到ることとなる。さらに、クリップ接合は力学的な方向性を有していることも注意しなければならない点である。すなわち、図 3.2.2.9(b)において正方向に変位を与えた場合には比較的安定した剛性を保ちつつ耐力が上昇しているのに対して、負方向に変位を与えた場合には小さな荷重値（およそ 0.05kN）にてすべりが発生することでそれ以降の耐力上昇は確認されない。以上のような水平載荷時の脱落挙動および方向性を考慮した上で天井の耐震性能を論じなければならない。

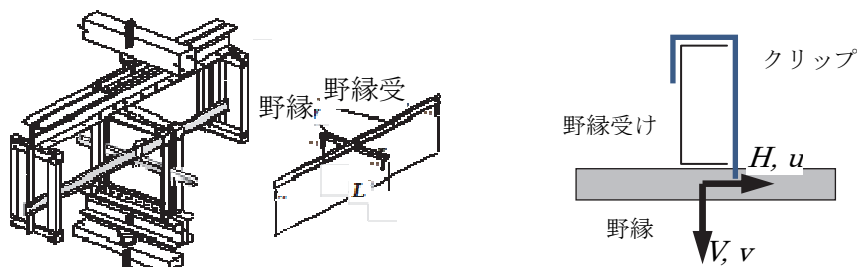



図 3.2.2.8　クリップ接合部性能試験

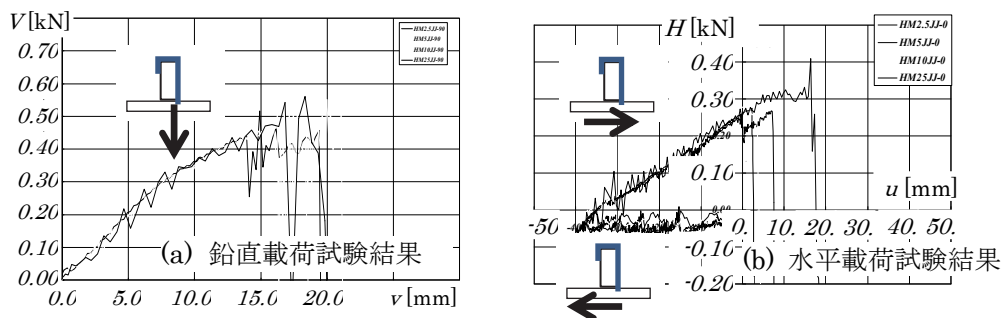



図 3.2.2.9　現行の JIS 規格クリップ接合部試験結果

近年、上述したクリップの脆弱性を踏まえて、水平載荷時の耐力を向上させた接合金物が開発されている。その一例を以下に示す[3)]。この例では、吊りボルトに斜め振れ止めを取り付けるのではなく特別な金物を用いて野縁受けに取り付ける仕様とした天井試験体の静的加力実験を行った。使用した部材断面などは、野縁：耐風仕様、野縁受け：C-38x12x1.2、斜め振止：C-40x20x1.6、クリップ：耐震用クリップ（耐風圧仕様に準拠)、ハンガー：ボルト止めによる脱落防止、となっている。なお、天井面の大きさは2m×3mであり、吊りボルト間隔：0.9m、天井懐：1.5mである。斜め振れ止めはV字形式のものを2対配置した。斜め振れ止めの角度 はおよそ60°である。加力は、加力方向に関わらず、短辺方向に強制変位を静的に与えている。

実験によって得られた荷重変位関係を図3.2.2.10に示す。本実験によって確認される剛性は変位が小さい段階から大きく変動し低下している様子が確認される。ただし、変位がある段階に達すると比較的安定した剛性が確認され、剛性；Kh は両方向ともに 0.24kN/mm（一対あたり 0.12kN/mm）となっている。ただし、この値は、図3.2.2.10(a)の細線によって示している部材の偏心などを無視した単純なモデルにより求めた剛性と比べるとかなり

(a)野縁方向加力　　(b)野縁受け方向加力

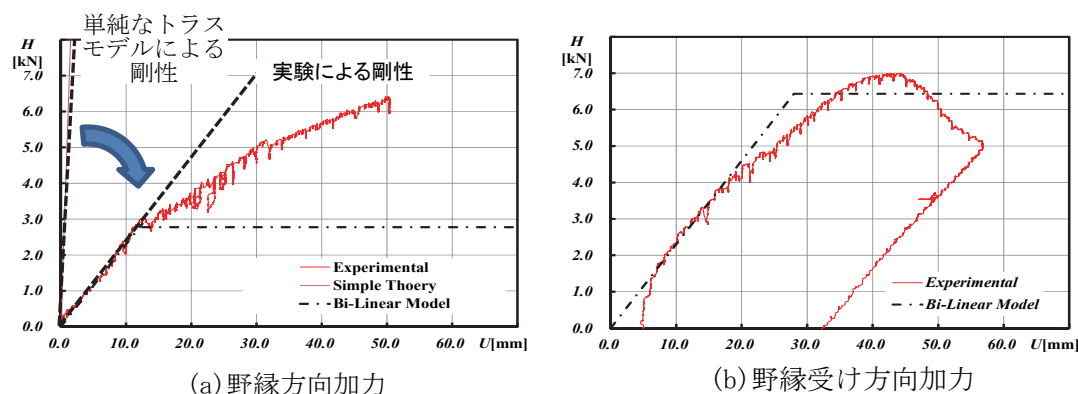



図 3.2.2.10　水平荷重-水平変位関係

(a)野縁方向加力　　(b)野縁受け方向加力

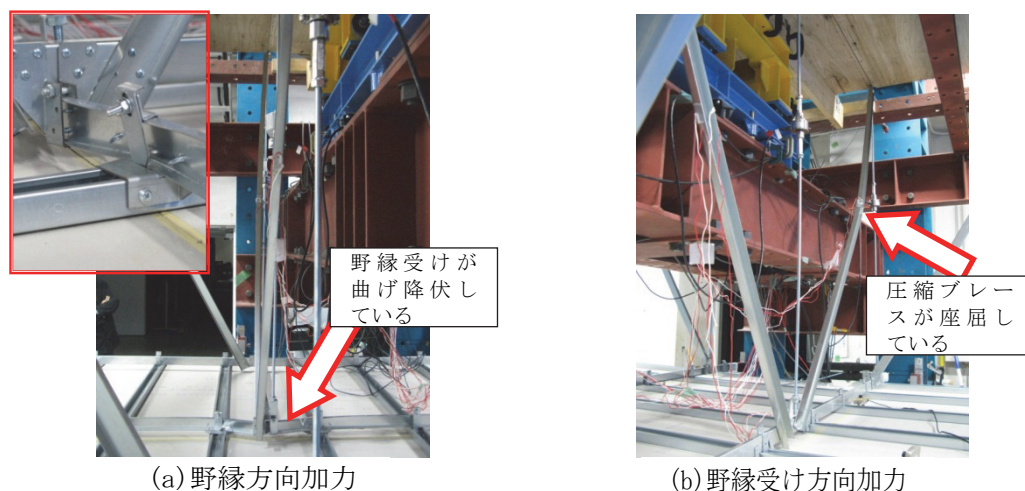



図 3.2.2.11　最終変形状態

低い値となっている。理論値に比し剛性がかなり小さくなる理由は局部的な偏心などによる曲げ変形によるためと判断され、このような偏心による影響は仕様によって異なることは明らかであり、設計に用いる剛性は仕様ごとに実験的に確認する必要があるものと思われる。最終変形状態を図 3.2.2.11 に示す。最終的な損傷形式は加力方向で異なっており、そのために荷重-変位関係も異なったものとなっている。すなわち、野縁方向加力時の損傷形式は「斜め振れ止めが取り付く野縁受けの曲げ変形」となっており、このために、非弾性領域においても安定した荷重-変位関係が得られているのに対して、野縁受け方向加力時の損傷形式は「斜め振れ止め自体の座屈」となっており、最大耐力に達した後に耐力劣化現象が確認されている。

このときの耐力評価が理論的に説明されるかどうかについて行った検討を以下に示す。

野縁方向加力時:この場合には斜め振れ止めが取り付く野縁受けの曲げ降伏によって非弾性挙動へと移行する。したがって、V 字一対あたりの全塑性耐力 $P_{\max}$ は、図 3.2.2.12 のような野縁受けの崩壊機構を考えることで求められる。すなわち、

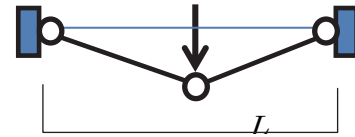



図 3.2.2.12　崩壊メカニズム

$P_{max} = 8M_p/L_c$

M_p：野縁受けの弱軸回りの全塑性曲げモーメント

L_c：野縁受けの支点間距離（クリップ間距離）

ここで、M_p = 53kNmm（σ_y=315N/mm^2；素材試験より），L_c = 300mm を用いて上式を計算すると、P_{max} = 8×53/300 = 1.4 [kN/対]となる。今回の実験ではＶ字型斜め振れ止めが 2 対設置されていることから、試験体としての終局耐力 H_p は、$H_p = P_{max}$×2 対=1.4×2 = 2.8 [kN]となる。

野縁受け方向加力時：　この場合にはブレース自体の座屈により試験体の耐力が決定される。今回使用した斜め振れ止め材の細長比を両端ピン支持として求めると、$\lambda=l_k/i$=1750/6.2=280 となり、斜め振れ止めは弾性座屈することが解る。そこで、両端ピン支持状態の斜め振れ止めの弾性座屈荷重を求めて、これから試験体としての最大耐力 H_p を求める。

$P_{cr} = \pi^2 EI/l_k^2 = \pi^2 \times 205 \times 4730/17502 = 3.2$ [kN/本]

$H_{cr} = 2P_{cr} \times \cos 60° = 2 \times 3.2 \times 1/2 = 3.2$ [kN/対]

$H_p = H_{cr}$×2 対 $= 3.2 \times 2 = 6.4$ [kN]

以上のようにして求めた野縁方向および野縁受け方向の H_p を示したものが図 3.2.2.10

中の一点鎖線である。両者ともに実験結果とよく対応するものとなっており、耐力を適切に評価していることが解る。つまり、先の従来のクリップ接合とは異なり、ここで用いた補強された接合部仕様を用いることで、部材の耐力によって全体の挙動が決定されていること、またこのために、天井全体の耐力が理論的に算出されることとなり、耐震性能を比較的高精度で推定することが可能となるものと思われる。

同じ接合金物に対して行った動的繰返実験結果について説明する。動的繰返載荷実験は起振器によって、それぞれの目標耐力を振幅とする動的な繰返力を天井面に作用させている。ここで、目標耐力とは許容耐力であり、ここでは 2.0kN としている。図 3.2.2.13 は前述の静的単調載荷実験結果と動的繰返載荷実験結果を比較したものである。動的実験結果は目標の耐力内での繰返載荷において、静的実験結果とほぼ対応する安定したループを描いており、本接合金物が目標耐力に対して十分な性能を有していることが理解される。

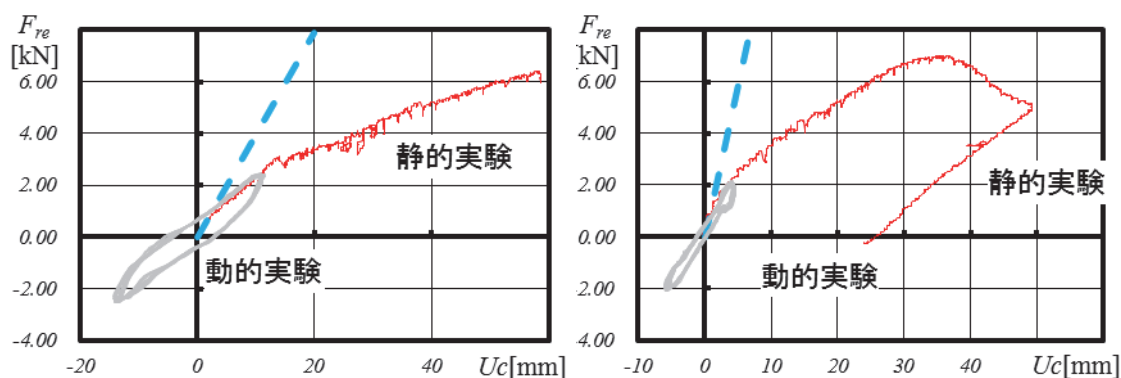



図 3.2.2.13　動的繰返載荷実験結果と静的単調載荷実験結果

(2) 天井システムとしての実験

次に、前述した JIS 規格クリップ接合を有する天井の系としての性状について述べる。独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター所有の震動台 E-defense による実大５層鉄骨構造の実験が 2009 年 3 月～ 4 月に行われ（免震制振実験 WG、主査：東工大笠井和彦教授）、本プロジェクトの一部として制振デバイスを取り除いた非制振状態の試験体では最上階に鋼製下地在来工法天井を設置した[2)]。図 3. 2. 2. 14 に E-defense に設置された実大 5 層鉄骨造試験体を示す。図中実線で囲ったところが天井試験体①を設置した箇所である。部屋の大きさは 5m×7m である。 2 つの部屋に異なる形式の鋼製下地在来工法天井を設置した(図 3. 2. 2. 15)。天井試験体①は図 3. 2. 2. 16 に示すようにクリアランスを設けた上でブレースを設置した形式（図 3. 2. 2. 17 参照)、天井試験体②はクリアランスを設けず

図 3.2.2.14　E-defense による実大鉄骨実験

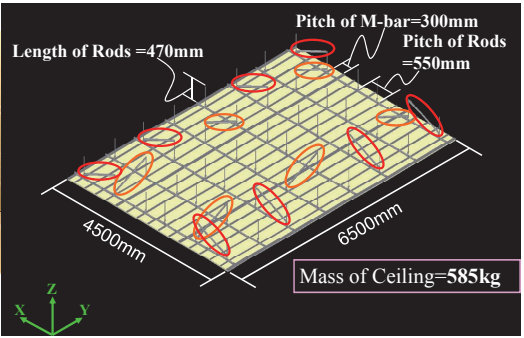
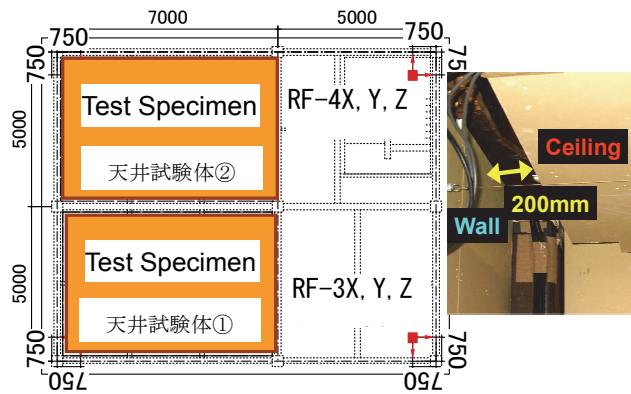



図 3.2.2.15　天井のレイアウト　図 3.2.2.16　クリアランス　図 3.2.2.17　天井試験体

表 3.2.2.1　最大加速度

Unit : gal Input Wave	①Ground (Table)	②Building (Roof Slab)	③Ceiling	Ratio 1 ②/①	Ratio 2 ③/②
5%	36	68	120	1.9	1.8
20%	151	293	578	1.9	2.0
30%	234	527	1149	2.2	2.2
40%	248	863	1477	3.5	1.7

に周辺の壁に接するように天井面を配置した形式である。試験体①のブレース設置箇所数は、野縁方向に 6 箇所、野縁受け方向に８箇所である。実験に用いた入力加速度は、鷹取波として、その最大加速度を 5%,20%,30%,40%･･･70%にスケーリングした加速度波形としている。ただし、天井試験体①は鷹取波 40%にて全面落下した。

計測された加速度の一覧を表 3.2.2.1 に示す。まず、建物の増幅を検証するために建物の屋根において計測された加速度についてみると、鷹取波 30%までは入力値に対してほぼ２倍の増幅率となっているが、鷹取波 40%の場合には 3.5 倍にまで増幅している。これは比較的小さい入力の場合には内外装の壁などにより剛性が高くなるためと思われる。次に屋根スラブにおける加速度に対する天井面における加速度の比率をみると、およそ 2 倍程度となっている。加振前の初期状態における天井の固有周期は 0.307sec であることを予備実験で確認しており、また、既往の研究から減衰定数は 3%程度ということが解っている。そこで、応答スペクトルを用いて天井面の加速度を推定してみると（図 3.2.2.18 参照)、鷹取5%入力時の実験結果と推定値は高い精度で対応しているが、同 20%の場合には両者のズレは大きくなる。これは天井システムが線形システムではなくなっていることを示している。そこで、天井の履歴特性を検討するために慣性力-変位関係を図化したものが図 3.2.2.19 である。図中、細線が計測値を、黒線は 10Hz でローパスフィルターをかけた結果、一点鎖線は初期状態の剛性を示している。これらの図から鷹取 5%の場合天井システムはほぼ線形とみなせるが、同 20%の場合には非線形性を帯びてくることが理解される。鷹取 20%のときの耐力は 2.24kN であり、この値およびブレースが６箇所に配置されていることからブレース１箇所あたりの負担水平力は 2240N/6 箇所=373N となる。この値はクリップ接合単体実験結果とほぼ対応する結果となっている。言い換えれば、接合部での耐力にて全体挙動が決定されていることになる。

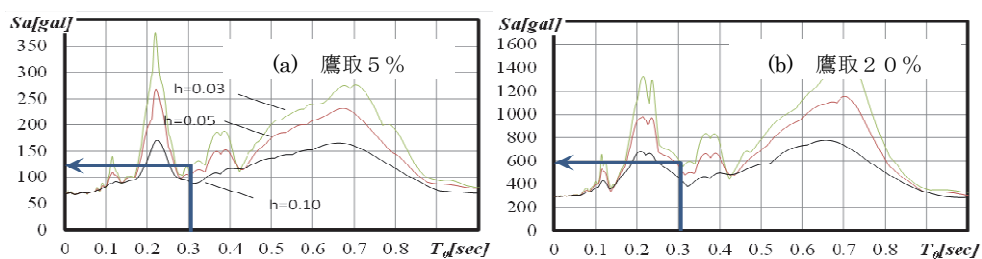



図 3.2.2.18　床応答スペクトル

図 3.2.2.19　天井面の慣性力-変位関係

6. クリアランスがない場合の損傷制御

(1) 概要

クリアランスを設けない場合には天井の耐震性能は天井面の強度ならびに壁などの周辺要素の特性に強く依存する。ここでは、最初に天井面と周辺要素から成る系としての設計方針について述べる[6)]。

クリアランスがない場合には図 3.2.2.20 に示すように、天井面と周辺の壁などによって系を形成する。すなわち、天井面を一質点としてみなせるとすれば、図 3.2.2.20(c)に示すような天井面の全質量と周辺要素のバネから成るシステムとして表現される。したがって、損傷制御を図るためには、固有周期を推定し天井面に作用する慣性力（地震力）を求め、この慣性力に対して天井面ならびに壁等が健全であることを確認する必要がある。

図 3.2.2.20(b)のように支持材を縦に流す仕様の壁を想定すると、支持材一本当たりのバネ定数は、

$$K[N/m/本] = \frac{3EIh}{a^2(h-a)^2} = \frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)^2}\frac{3EI}{h^3} \tag{3.2.2.1}$$

となる。ここに、E, I, h は支持材のヤング係数，断面 2 次モーメント(強軸)および材長であり、a は支持材支点と天井面間の距離であり、$\alpha = \frac{a}{h}$ は支持点・材長比である。単位幅あたりのバネ定数は、ピッチを p で表すと、上式から、

$$K[N/m/m] = \frac{3EIh}{a^2(h-a)^2 p} = \frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)^2 p}\frac{3EI}{h^3} \tag{3.2.2.2}$$

となる。天井の単位質量を m，天井の長さを L とすれば、図 3.2.2.20(c)のシステムの固有周期は次式にて表される。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{mL}{k}} = 2\alpha(1-\alpha)\pi\sqrt{\frac{1}{3n}\frac{mLh^3}{EI}} \tag{3.2.2.3}$$

(a) 対象天井　(b) 壁の曲げ剛性　(c) システム概念図

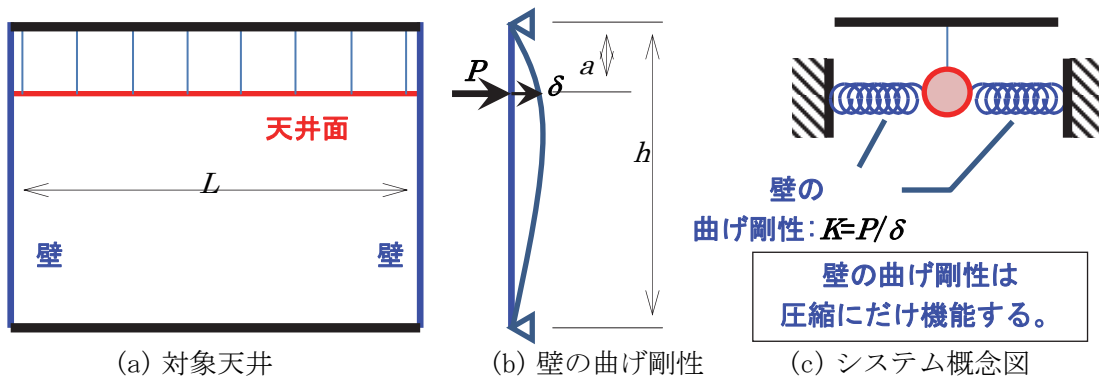



図 3.2.2.20　クリアランスがない天井の概念図

式(3.2.2.3)を用いて固有周期を求めた一例を示す。壁の仕様は、スタッド断面；C-50x45x0.8，材長；h=2,500mm，ピッチ；455mm である。

A：支持材位置；a=250mm（α=250/2500=0.10）とした場合

この場合の単位幅あたりのバネ定数は以下のようになる。

$$k=\frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)^2 p}\frac{3EI}{h^3}=\frac{1}{0.1^2\times(1-0.1)^2\times 0.455}\frac{3\times 205{,}000\times 56{,}000}{2{,}500^3}$$

$$=5.98\times10^2\,N/mm/m=5.98\times10^5\,N/m/m$$

B：支持材位置；a=500mm とした場合には、同様に、$K=1.89\times10^5\,N/m/m$

以上の値を用いて天井の固有周期を求めたものが図 3.2.2.21 である。

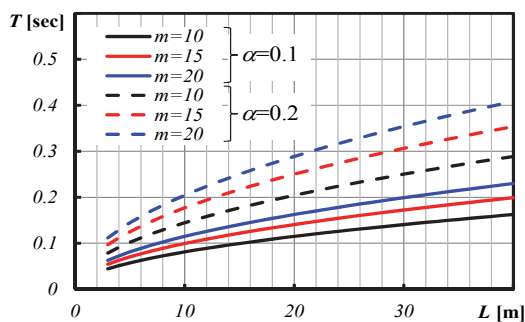



図 3.2.2.21　スタッドのみの剛性

上式中の曲げ剛性 EI はボードの影響を無視したものを採用しているが、壁面ボードの曲げ剛性に及ぼす影響を考慮して壁の曲げ剛性が両者が完全に一体となったものとして計算するとおよそ 2～3 倍程度となる。このことを実験で確認したものが図 3.2.2.22 である。変位が小さい領域では完全一体として計算した曲げ剛性と等しく、その後ボードに損傷が発生した段階でスタッドのみの曲げ剛性となることが確認される。したがって、変位が小さい領域を対象とすれば、スタッドとボードは完全一体状態にあると言える。このボードの曲げ剛性への影響を考慮して固有周期を求めた結果が図 3.2.2.23 である。実状としては、図 3.2.2.21 の結果よりも図 3.2.2.23 で示す結果がより適切な結果であると考えられる。ちなみに、天井システムに入力される加速度（建物の応答加速度）が天井面で増幅されることはないと考えられる固有周期を 0.1sec とすれば、天井長さ L が 10m(α=0.2)～20m(α=0.1)程度であれば満足されることとなる。

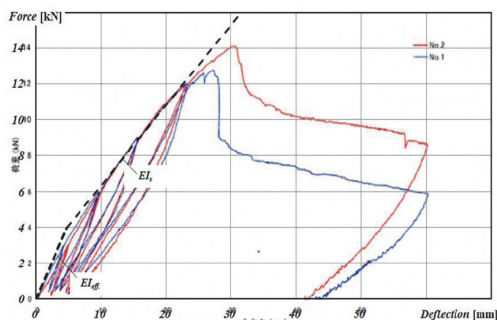



図 3.2.2.22　LGS 壁の曲げ実験

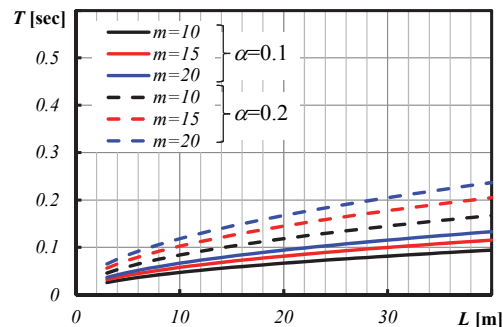



図 3.2.2.23　ボード考慮

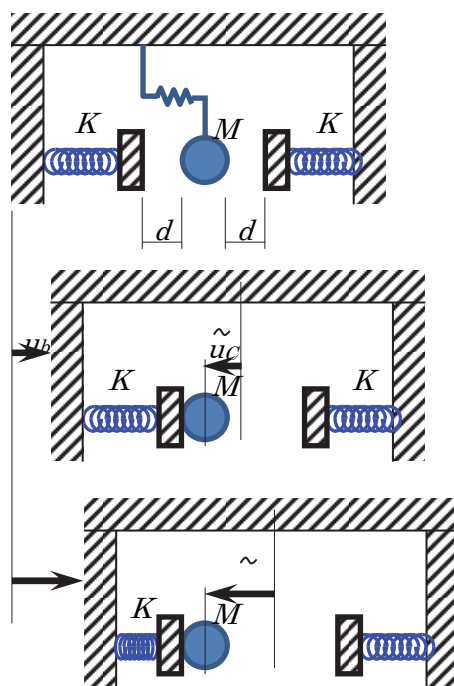
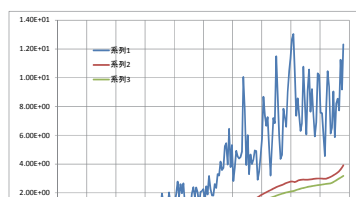
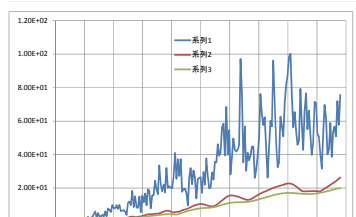
(2) 不可避的なギャップによる衝撃力

クリアランスなしとする仕様であっても施工上の誤差などによって天井面と周囲の壁との間には隙間（以下、これをギャップと呼ぶ）が生じる。ギャップがある場合には、地震時に天井面と周囲の壁との間において衝突が発生し、そのときに衝撃力が発生する可能性がある。設計にあたってはこの影響を考慮する必要がある。

図 3.2.2.24 はギャップがある場合の概念図である。この場合の天井面の応答はギャップの大きさに大きく依存する。ここで最も重要な課題は地震時に発生する最大衝撃力を推定することである。一般に図 3.2.2.24 に示すような問題において発生する最大衝撃力は、衝突－離間－衝突－離間といった定常状態になったときに発生する。さらに、問題を簡単にするために天井自体の剛性はゼロとすれば、離間時の速度および衝突前後の速度はほとんど変化しないと考えられる。この仮定から、最大衝撃力 F_{max} は次式にて求められる。

図 3.2.2.24　ギャップが存在する場合

$$F_{\max} = \sqrt{mLk}\,v_0$$

ここに、v_0 は衝突時の速度である。また、衝突時の速度は対象となる地震波の応答スペクトルを用いて求めることができる。すなわち、変位応答スペクトルおよび速度応答スペクトルが図 3.2.2.25(a, b)のように求められたならば、速度応答–変位応答関係図を求める（図 3.2.2.25(c)）。この図から変位応答がギャップの大きさと等しくなるときの速度を求めれ

(b) 変位応答スペクトル

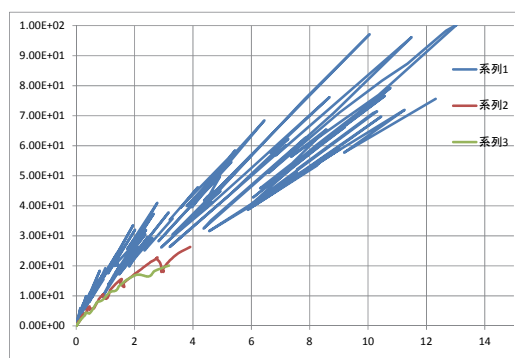
(c) 速度応答スペクトル

(a) 変位応答－変位応答関係

図 3.2.2.25　対象入力加速度の応答スペクトル

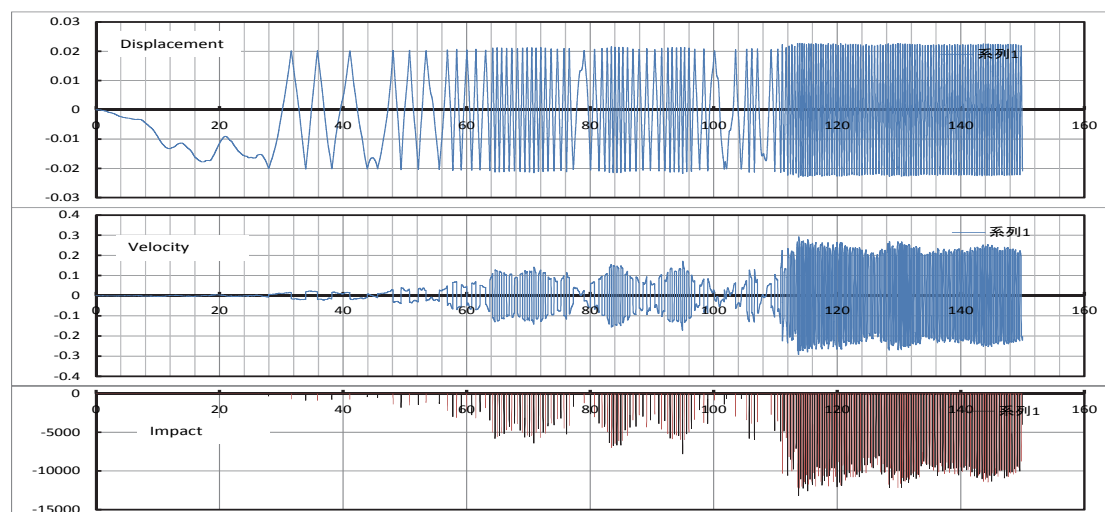
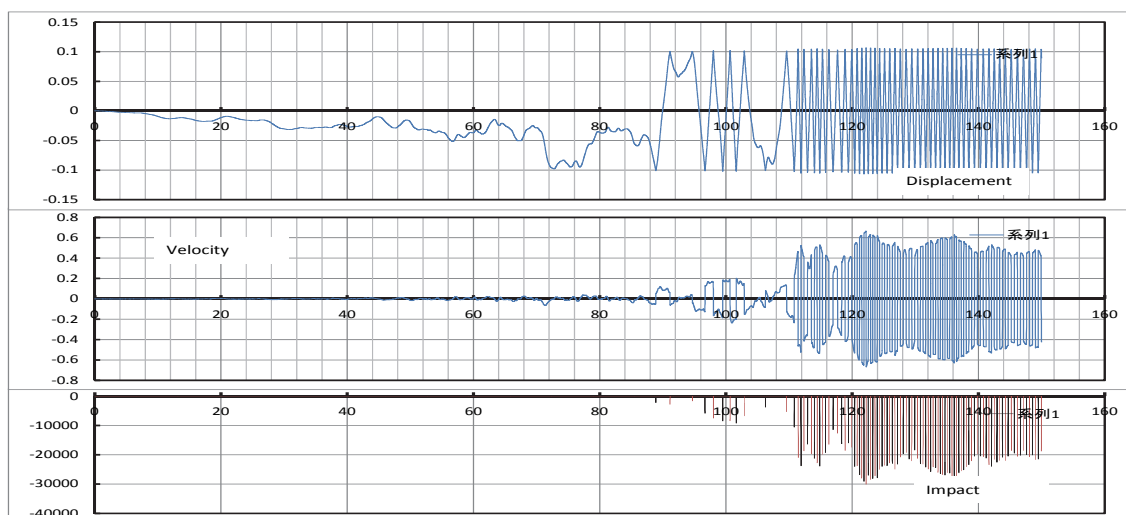
ばよい。図 3.2.2.25 の例で言えば、例えば、ギャップが 2cm, 10cm の場合には、速度は 20cm/sec, 60cm/sec とそれぞれ得られる。これらの値の妥当性を検証するために時刻歴解析を行った結果が図 3.2.2.26 である。

(a) ギャップ=2cm

(c) ギャップ=10cm

図 3.2.2.26　時刻歴解析による衝突時の挙動

これらの結果は先に予測した結果とよく対応していることが解る。また、比較的小さな入力加速度であるにも関わらず、衝撃力は大きなものとなっており、設計時にはこの影響を無視することはできない。

(3) 天井面の圧縮強度

ここでは、材長が異なる吊りボルト（天井懐）にて支持された天井面に圧縮力が作用した場合の挙動について解析した結果を述べる [4)]。

まず、数値解析モデルの妥当性を検証するために用いた既往の実験について概要を説明する。試験体は図 3.2.2.27 に示すように一般的な平天井に倣って組まれている。試験体全体の寸法は 3,640×3,640mm で 910×910mm のボードを基本として天井面を構成している。ダブル野縁は 910mm ピッチでボードの継ぎ目に接続され、シングル野縁がその間に等間隔で 2 本配置されている。野縁受けは 803～850mm ピッチで配置され、野縁方向における吊りボルトのピッチとなっている。吊りボルトの長さは 1,500mm であり、野縁受けとの接合部ではハンガーが、吊り元では折板インサート金物が使用されている。載荷方法は天井面の一端を拘束し他端にてボード断面を一様に圧縮する形式となっている。

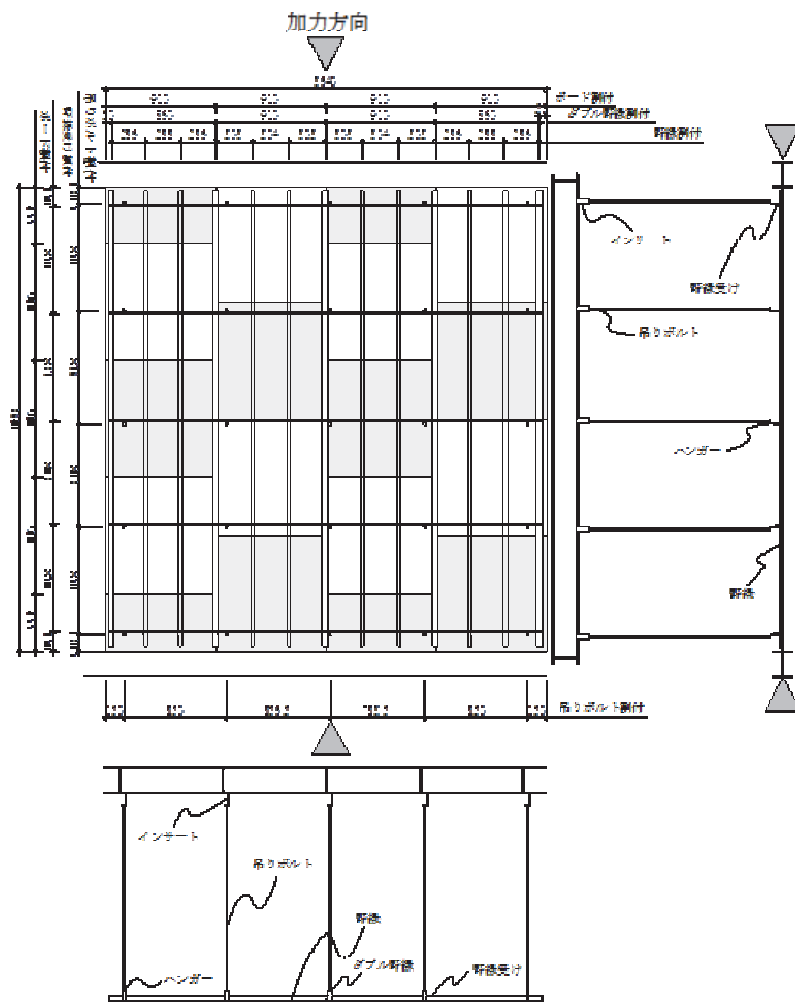



図 3.2.2.27　天井試験体

この静的圧縮実験の再現解析を行うことで解析モデルの妥当性を検証する。詳細は割愛するが、解析モデルにおいて、ハンガーやインサート金物による、吊りボルト端部での偏心を考慮してモデルを作成した。すなわち、ハンガーは野縁受けと吊りボルトを、インサ

ート金物は吊りボルトと吊り元を連結させることにより、ハンガー、インサート金物による接合部の偏心を表現している（図 3.2.2.28 参照)。なお、天井ボードを含むすべての部材は弾性状態にあるものとしている。

実験および数値解析で得られた荷重変位関係を比較したものを図 3.2.2.29 に示す。また、実験における最終変形状態を図 3.2.2.30 に、解析によるものを図 3.2.2.31 に示す。荷重変位関係および天井面の面外変形および吊りボルトの屈曲状態、いずれも数値解析結果は実験結果をよく表している。なお、すべての部材を弾性として解析しているにも関わらず、急激な耐力劣化が発生する理由は、天井面の図心がボードにビス止めされた野縁の影響に

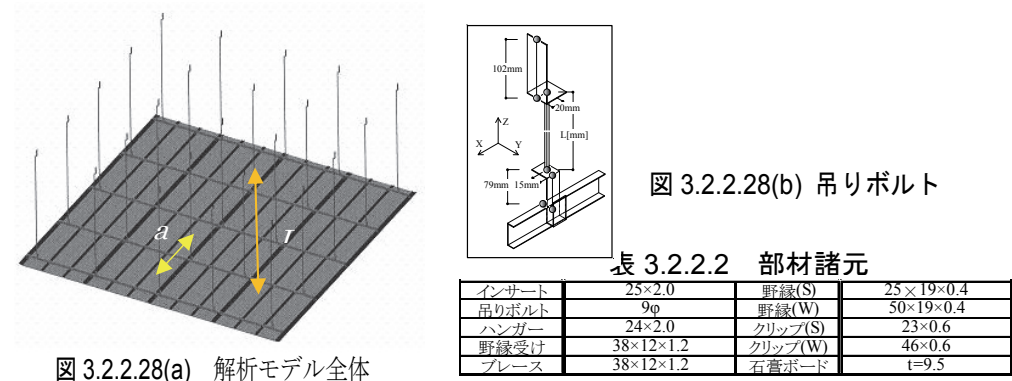



図 3.2.2.28(a)　解析モデル全体

図 3.2.2.28(b) 吊りボルト

表 3.2.2.2　部材諸元

インサート	25×2.0	野縁(S)	25×19×0.4
吊りボルト	9φ	野縁(W)	50×19×0.4
ハンガー	24×2.0	クリップ(S)	23×0.6
野縁受け	38×12×1.2	クリップ(W)	46×0.6
ブレース	38×12×1.2	石膏ボード	t=9.5

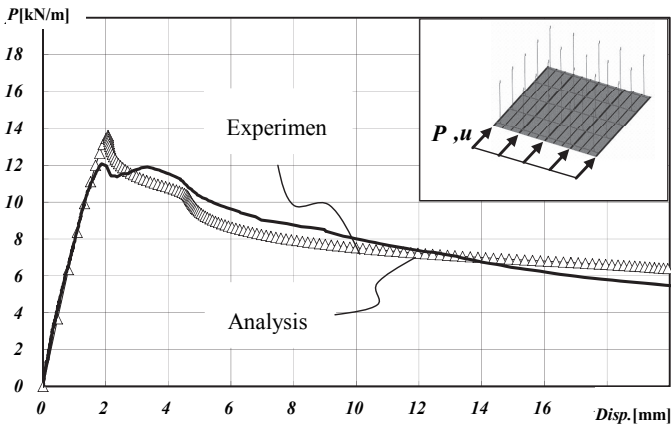



図 3.2.2.29 荷重変位関係

図 3.2.2.30　実験での崩壊性状

図 3.2.2.31　解析による崩壊性状

よってボード中央面ではなくなるために偏心圧縮状態となり、その結果、吊りボルトの材軸（鉛直）は荷重方向（水平）とは直交するにも関わらず吊りボルトには圧縮力が作用し、その値が吊りボルトの座屈耐力に達した段階で天井面は急激に不安定となる。このために、最大耐力点は吊りボルトの長さが長くなるにつれて小さくなる。

上記解析モデルを用いて、吊りボルトの長さをパラメータとして行った解析結果を図 3.2.2.32 および 3.2.2.33 に示す。図 3.2.2.32 は荷重変位関係、図 3.2.2.33 は天井面の最大耐力と吊りボルト長さ関係である。吊りボルトの長さが短くなるほど天井面の耐力が上昇しており、吊りボルトが天井面の圧縮耐力に及ぼす影響が大きいことが理解される。また、図 3.2.2.34 に吊りボルトに発生した軸力の推移を示す。図 3.2.2.33 と合わせてみることにより、吊りボルトが最大耐力に達した変位段階で、天井面の耐力が最大となっていることがわかる。図 3.2.2.35 に吊りボルトの最大耐力とインサート金物とハンガーを含めた吊りボルト部の全長との関係を示す。解析によって得られた最大耐力は弾性座屈荷重の理論値であるオイラー座屈荷重；

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_R I_R}{L^2} \quad (E_R = 205{,}000[\mathrm{N/mm^2}],\ I_R = 321[\mathrm{mm^4}]) \qquad (3.2.2.4)$$

とよく対応している。以上のことから、吊りボルトの弾性座屈により天井面の最大耐力が

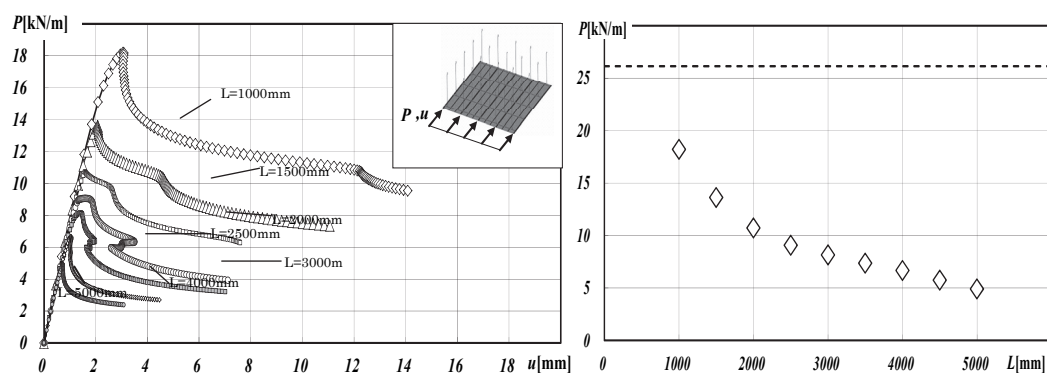



図 3.2.2.32 荷重変位関

図 3.2.2.33 最大耐力-吊りボルト長さ

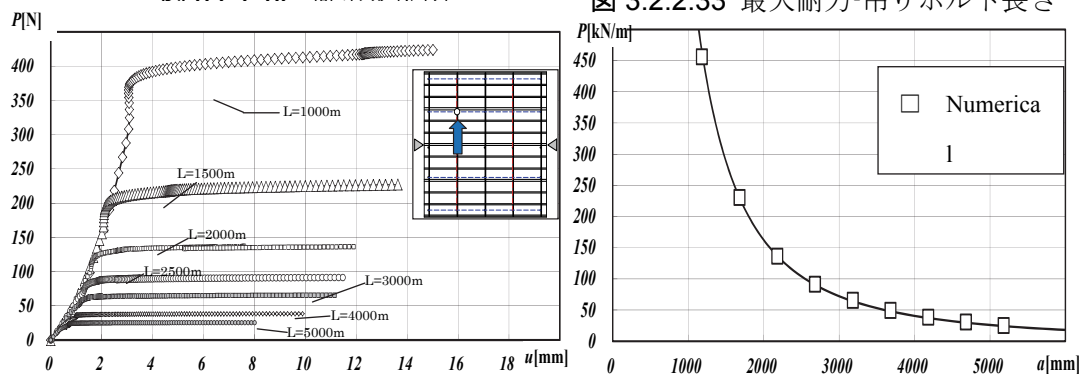



図 3.2.2.34 吊りボルト軸力-変位関係

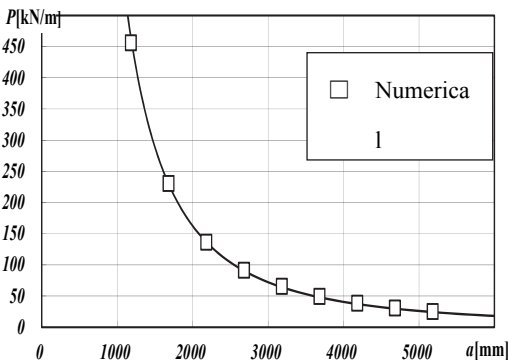



図 3.2.2.35 吊りボルト最大耐力-材長関係

決定されていると判断される。

吊りボルトの長さおよび吊りボルト間隔をパラメータとした解析を行い、吊りボルトの座屈耐力が天井面の最大耐力を決定づける要因になりうることが明らかとなった。さらに、吊りボルトの座屈耐力が天井面の耐力を規定していることを吊りボルト中間に振れ止めを設けたモデルを用いて吊りボルトの座屈耐力が天井面の最大耐力を決定づける要因であることを検証する。ブレースや水平振れ止めを設置することによって、吊りボルトの軸剛性は変化しないが、吊りボルトの座屈長さが変化する。

図 3.2.2.36 にブレース、水平振れ止めの設置位置を示す。破線がブレース。水平振れ止めを設置した構面である。端部からそれぞれ２列目の吊りボルトが、天井面の最大耐力に達する際に座屈するため、この列を重点的に補剛することを考えた。図 3.2.2.37 に荷重変位関係を示す。ブレースと水平振れ止めが設置されたことにより天井面の最大耐力が向上し、吊りボルトの長さが半分の 1500mm の最大耐力に相当する耐力にまで向上している。天井懐の深さは様々な理由にて決定されることから吊りボルトの実際の材長を短くすることは難しいが、吊りボルトの有効座屈長さあるいは有効細長比を短く小さくすることで天井面の安定性を確保することができる。

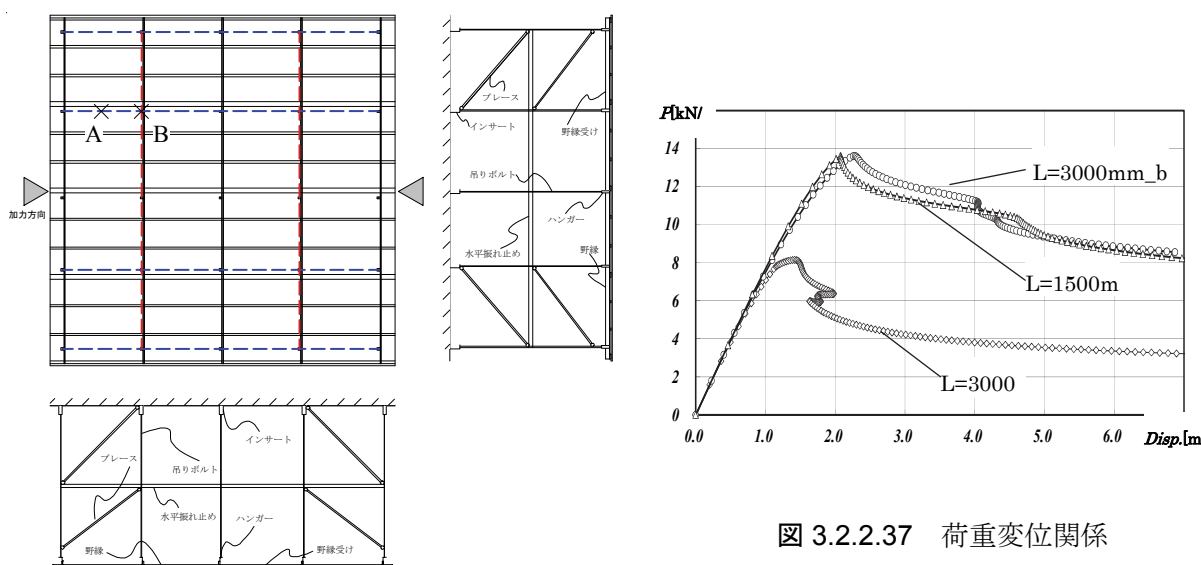



図 3.2.2.37　荷重変位関係

図 3.2.2.36　振れ止めの配

(4) そのほかの注意事項

面積の大きな天井の場合などでは、クリアランスがない機構、すなわち、天井周辺の構成要素に直接慣性力を伝達する形式を採用することが力学的に難しい場合がある。これは天井面の安定性や周囲の構成要素の力学的特性に依存するためである。このような場合には大きな天井面を分割し、分割した領域ごとに慣性力に対する受け梁を設けることで解決

することができる。このような考え方は曲率や段差を有する天井にも適用することができる。

７．最後に

本項では、損傷制御を目的とした耐震設計の考え方の一例を示した。必ずしもここで示した方法による必要はないが、設計者は様々な観点から設計に必要な事項を整理・検討した上で仕様を決定していくことが肝要である。また、非構造材の仕様や工法は今後日進月歩で進められていくと考えられることから、常に新しい情報を基に設計に向き合っていくことも重要である。そのような非構造材の進歩に本項で記載した内容が一助となれば幸いである。

参考文献

1) 例えば、中川祐介,元結正次郎：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集. B-1、pp. 847-848、2006

2) 佐藤恭章,元結正次郎,川西拓人,水谷国男,笠井和彦,引野 剛：損傷を受けた天井およびスプリンクラーの動的性状に関する検討 ： E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 73、日本建築学会学術講演梗概集. C-1、pp. 835-836、2010

3) 例えば、金井崇弘,元結正次郎：部分天井試験体を用いた動的および静的実験－強化されたクリップを用いた在来工法天井に関する研究　その 1、日本建築学会学術講演梗概集. B-1、pp. 847-848、2012

4) 例えば、元結正次郎：野縁受け方向における天井面の圧縮性能に吊りボルトが与える影響－鋼製下地在来工法天井における天井面の安定性に関する研究　その 3、日本建築学会学術講演梗概集. B-1、pp. 847-848、2012

5) 平成 23 年度建築基準整備促進事業「地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討」（事業主体：一般社団法人建築性能基準推進協会）

6) 平成 24 年度建築基準整備促進事業「地震による天井脱落対策の実務的な課題に関する検討」（事業主体：一般社団法人建築性能基準推進協会）

3.2.3　各種耐震工法による損傷制御の実態

1. はじめに

ここでは現在最も広く用いられている天井工法である在来軽量鋼製下地天井（以下在来軽天）工法を中心に、地震時の機能維持を目的とした天井下地の損傷制御の計画手法と、設定した設計外力に対する天井下地材の発生応力や変位を特定し適切な天井下地計画を行うための注意点などを紹介する。

2. 在来軽天下地における損傷制御

(1) 力の伝達経路の整理

吊天井の耐震工法では、外力に対し力の伝達経路を整理し、経路上の各々の部材が必要な性能を発揮するよう設計施工する。

吊り天井の地震時の力の流れについて概説する。まず，一般的な在来軽天工法の吊り天井の重量のほとんどは天井材が占めている。その自重および鉛直方向の地震力は，天井材の固定ビスから野縁に，野縁からクリップで野縁受けと呼ばれる直交材に，野縁受けからハンガーに，ハンガーから吊りボルトに，吊りボルトからインサートアンカーやクランプを経て吊り元である構造体へ伝達される。水平力については，斜め振れ止め（以下、ブレースと呼ぶ）が設置されている場合は，天井材からビスを通じて野縁へ，野縁からクリップを介して野縁受けに，そして多くの場合野縁受け，または野縁受け直交材などにビスで接合されたブレースに流れ，ブレース上部の接合金物を通じて吊ボルト,インサート等を経て吊元の躯体へ伝達される（図 3.2.2.5、図 3.2.3.1 参照)。ブレースがない場合は，天井材端部から,接している構造体などへ直接伝達されることになり，その場合の挙動などについては，元結らの報告[1)] に詳述されている。

そのほかに、常時荷重としては天井および天井下地材の自重に対する安全性の確認が必要である。特に湿度の影響を受けるような部位では、天井構成部材の含水による自重の変化、ビスに依存して接合するボード材などでは、含水時の耐力低下等も、地震動による天井の応答性状・損傷モードに影響が生じるので注意が必要である。(3.2.4 項参照)

特に、屋外、半屋外で使用する天井の場合は、地震動だけではなく繰返しの風圧力に対する配慮が必要となる。適切な安全率の設定や緩み止め性能を付与すること、またはフェイルセーフ機構を設置する等、が必要となる。振動や劣化などによる鉛直支持力の喪失、天井および部材等の落下が想定される場合にも特段の注意が必要となる。

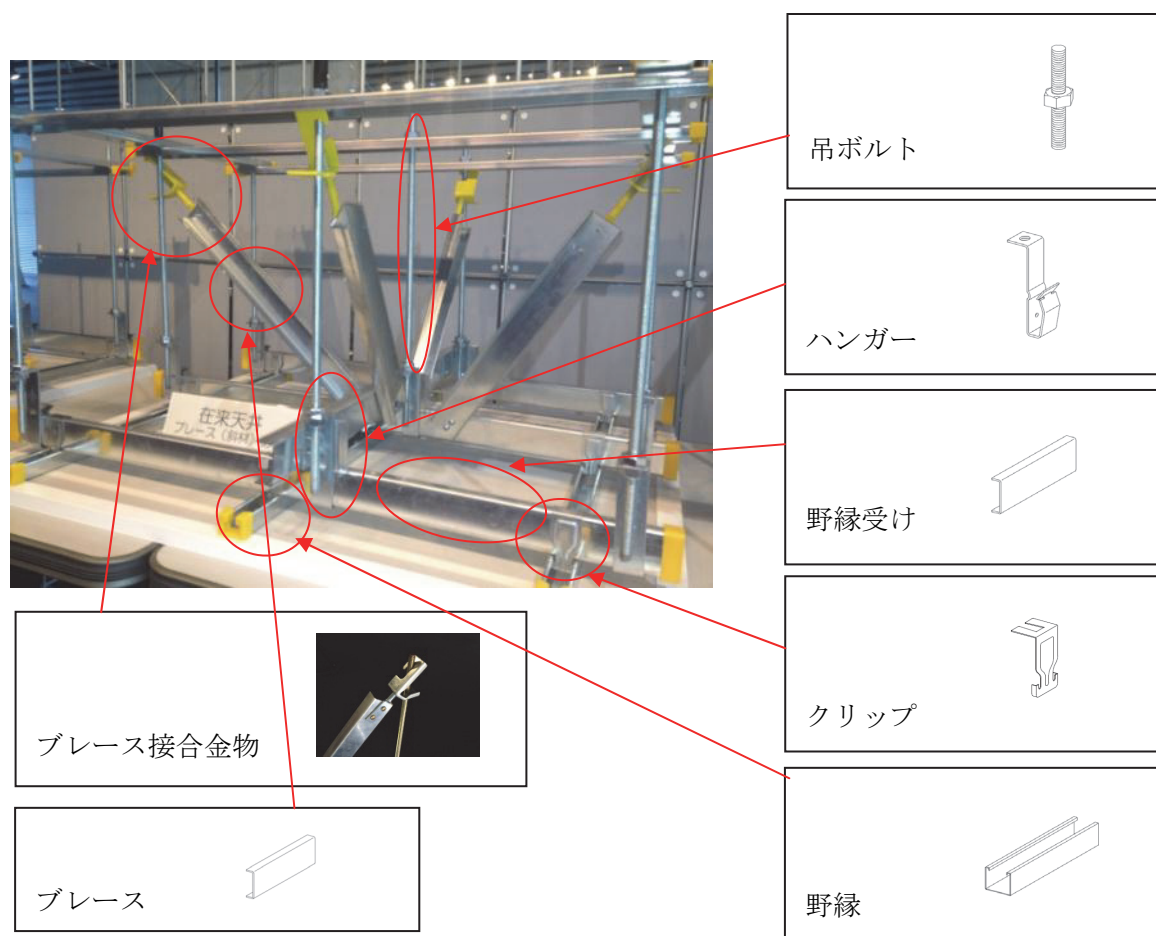



図 3.2.3.1　一般的な天井下地と部品の呼称

(2) クリップ・ハンガーの耐震計画

クリップ、ハンガーには、①地震時に部分的な損傷が生じても大規模な崩落（重損）に至らせない強度と冗長性、②天井に生じる慣性力を構造部材まで確実に伝達する接合部強度、の両方の機能が求められる。

図 3.2.3.1 に示す JIS A 6517 に規定されているクリップに関する耐力評価は、元結らの性能試験[2)]によって明らかにされており、鉛直方向で概ね 0.3～0.5kN 程度の最大耐力を有する。これらの部品で, 25 ㎡で質量 20kg/㎡程度（石膏ボード 2 枚貼り程度）の天井面慣性力 1.0G 相当分（≒5.0kN 分の水平力）をブレースから躯体へ伝達するのは，鈴木らの振動台実験[3)]によれば困難であることがわかっている。

ブレース近傍のクリップは，天井材の地震時水平力を野縁から野縁受け、そしてブレースに伝達するのに十分な剛性（回転防止性、曲げ変形防止性等）と接触力(以下、接合耐力)を有している必要がある。JIS A 6517 に規定されるクリップ以外にも,「耐風圧クリップ」

や「耐震クリップ」(図 3.2.3.2 参照) などと称し，これに見合った性能を有する接合金物が市販化されている。摩擦力に依存する部品と，ビスなどを用いた機械的接合による部品があり，肉厚や耐力もまちまちであることから「採用者側が適切な部品選定を行う知見を必要とする」という点に注意すべきである。接合耐力が十分にある部品の場合は、ブレース近傍に集中的に配置して機能を満足するであろうし，接合耐力が劣る場合は採用点数を増やして機能を満足することになる。鈴木らが実施した性能試験[3]によると、図 3.2.3.2 の補強クリップをブレース近傍に 9 か所採用したところ，25 ㎡で質量 20Kg/㎡の天井の 1.0G 分の水平力を躯体に伝達できた，としている。この場合，野縁，野縁受との接合部は摩擦力に依存するため，滑りによる変位が天井面に生じる。同実験において，天井の吊長さ (ふところ) 1500 ㎜に対し天井面最大変位は概ね 50 ㎜程度であったとされている。また，後述する図 3.2.3.10 のように，天井の重心に近い位置でブレースを接合した場合，接合部に生じる回転や曲げモーメントを抑制しやすくなり，地震時の天井の変位も制御しやすくなる。

さらに，補強クリップをビスなどにより野縁に固定すると，この部分の滑り量が低減でき，天井面の変位が小さく抑えられる。周囲にクリアランスが十分に確保できない場合などは，ビス併用の滑らないクリップを採用するのが有効である (図 3.2.3.2)。

ただし、この損傷制御方法は，力の伝達経路上のすべての部材や接合部が，目標とする外力に対して十分な耐力を保有していることが前提となる。1 か所でもボトルネック的に弱い接合部等が介在すれば、その部位の耐力でブレースが負担できる天井面積が決まる場合が多い。

ハンガーにおいても，摩擦接合やビスなどによる機械的接合が可能な部品が市販化されており (図 3.2.3.3)，クリップと同様の検討を行う必要がある。特に耐震ハンガー・耐風圧ハンガーと呼ばれる補強ハンガーでも，野縁受け方向は摩擦力に依存して接合しているため一定以上の水平力に対しては滑りが生じる。この場合，確実にブレースまで水平力を伝達するためには，ビスなどで野縁受けに貫通固定する方法が有効である。この場合のビスは，当該部分で負担する設計外力が特定できる場合はそれに応じて設計する。ちなみに鈴木らの実施した性能試験[3]ではハンガーに対し 4mm 径のタッピングビスを 1 面せん断方向に使用した場合に，25 ㎡で質量 20kg/㎡程度 (石膏ボード 2 枚貼り程度) の天井面慣性力 1.0G 相当分(≒5.0kN 分の水平力)に対し，破損等の現象は 10 体以上の試験体で発生しなかった。

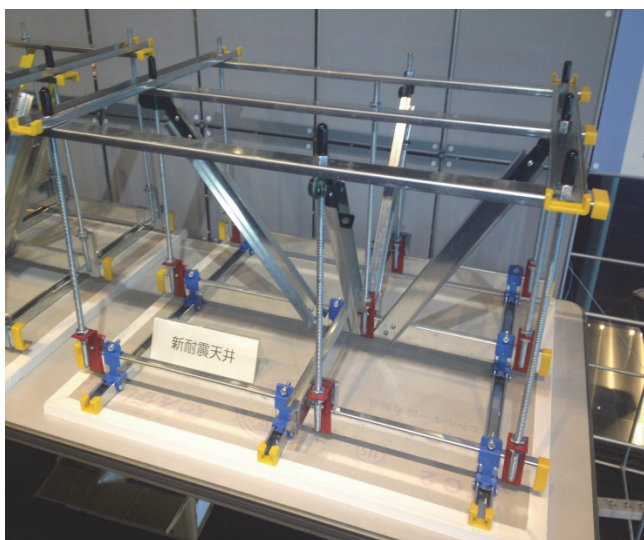
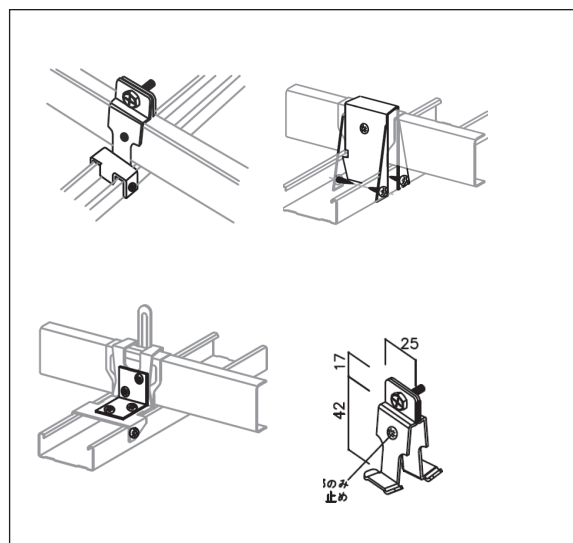
なお，このような性能を持つ補強クリップ・補強ハンガーを，天井の周囲や天井面の一定の範囲に分散配置または全数配置することで，地震時に天井に大きな変位が生じ周囲の構造体と衝突した場合も，連鎖的にクリップまたはハンガー部が損傷する現象を防止する効果も期待できる。但し，天井材のビス抜け等による落下を防止するまでの性能は期待できないので，安全性評価法を満たさない重い天井材を使用する場合は、あくまで人命保護は別立ての方法で確実に実現する必要がある。

↑補強したクリップ・ハンガーの使用例

↑接合耐力が高い補強クリップの例

図 3.2.3.2　ブレース周囲のクリップ補強の事例と部

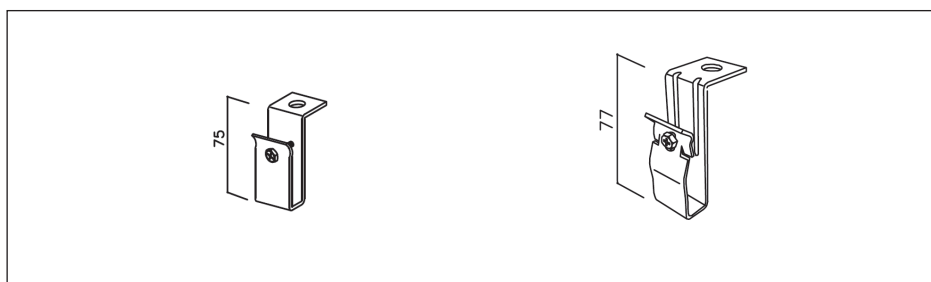



図 3.2.3.3　補強ハンガーの例

(3) ブレース（斜め振れ止め）

ブレースは、上下の接合部の変形、変位等により座屈耐力に非常に大きな影響を受ける。使用するディテールにみあった耐力評価方法にて設計する。

クリップ・ハンガーが天井面の慣性力をブレース接合部まで伝達できると，次にブレース接合部の設計が重要となる。ブレースの下端は，多くの場合，C-38 等の野縁受けまたは野縁受けに直交する部材に複数本のビス等を用いて接合さている。上端は吊ボルトの吊元付近に専用金物を用いて接合される。

ここで，ブレースの部材設計を実施するにあたって重要な注意点が存在する。下端のブレースを接合するコ-38×12×1.2 等の部材にねじれや変形が生じる場合，また上端の接合金物に回転や緩み、変形が生じる場合，いずれの場合もブレースの有効座屈長さが長くなる場合があり，座屈長さ 1.0（ピン-ピンの端部条件）の計算結果よりも小さな天井慣性力で座屈してしまう場合がある。(図 3.2.3.4、3.2.3.5)

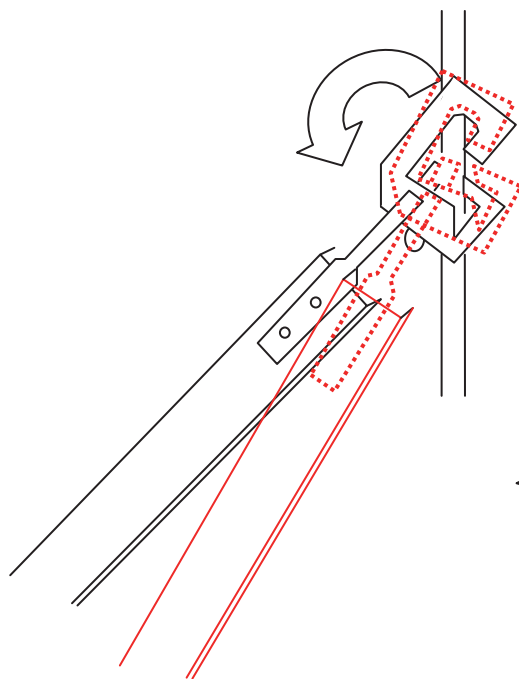
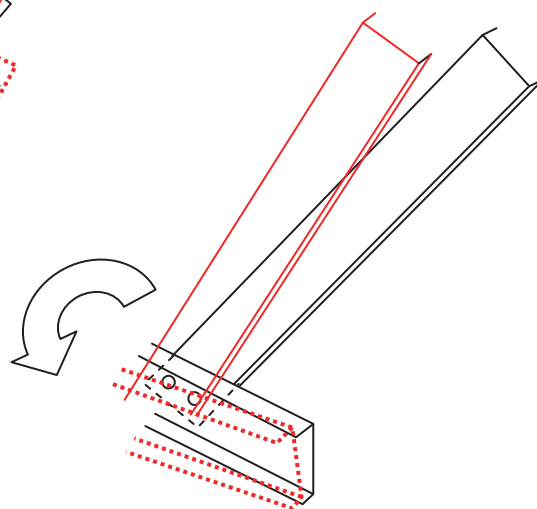



図 3.2.3.4　ブレース上部接合部の回転　　**図 3.2.3.5**　ブレース下部接合部のねじれ

また，ブレースの下端を図 3.2.3.6 のように離して接合すると，ブレースに入る軸力の方向の違いによって,接合している野縁受等の水平材がねじれるだけでなく曲げ破壊してしまう場合がある。ブレースの交点は極力近接して設置をするよう注意が必要である。または,ブレースの負担する天井面積（重量）に応じた曲げ耐力を持った部材を選定するか,専用の補強金物を採用するなどの対策が必要である。

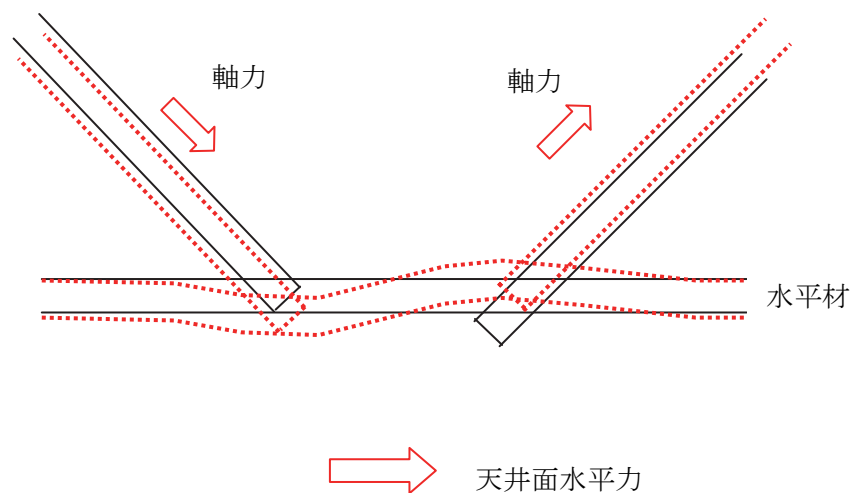



図 3.2.3.6　ブレース下部接合部のねじれ

次に，ブレースの上部接合部についての注意点を紹介する。施工性の良さから広く普及しているブレース接合金物（図 3.2.3.7）およびその類似製品は，ブレースが軸力を背負った場合に必ずしも意図通りの働きをしないケースが多い。ブレースに使用される材料がＣ型などの偏芯のある材料の場合，その傾向が特に顕著である。一般的にＣ型鋼とブレース接合金物は「羽子板」と呼ばれる接合ボルトを貫通ビスで接合する。こういった構成の部材を吊りボルトに引っ掛けて，羽子板ボルトを回転させて吊りボルトを締め込み，摩擦力に依存して固定するがものが多い。偏心した材料と図心のずれた接合部に圧縮軸力が導入されると，容易にこれらの部材に曲げ変形が生じ，もっとも脆弱な部位に応力集中する。多くのケースでは，羽子板金物の絞り込んだ部分に繰り返し曲げ変形が発生し破断する。またはブレースの曲げ変形等によって、引っ掛けた吊りボルトとの接合部が回転したり，ずれたり，はずれたりし，ブレースが座屈する前にブレース機能を失うケースが，2011 年東日本大震災の被害例でも多く発生し, 振動台実験[3)]でも頻繁に生じている（図 3.2.3.8）。図 3.2.3.7 のような金物を採用する場合は，当該部分に背負う軸力を十分に安全な大きさに制御すべきである。天井全体を軽量化するか, ブレース設置数をこれに見合うように設定することが重要である。

また、吊りボルトの中間部等にブレースが点付け溶接等で取り付けられているケースが散見される。この場合、2 つの点で天井に大きな損傷を与える可能性がある。一つは、吊りボルトの中腹にブレースを通じて地震時の天井慣性力が流れた場合、容易に吊りボルトに曲げ変形が生じ、吊元に繰り返しの曲げが生じ吊りボルト自身が破断する可能性が生じる。同時に吊りボルトに曲げが生じることにより天井面に上方向の変位が生じ、下地にも予期することが難しい曲げの影響や上下方向の応答加速度が生じる。二つ目に、吊りボルトと

ブレースの溶接であるが、基材のメッキ面を残したまま点付けされた溶接部には定量的な耐力は期待できず、評価も困難である。ひどい場合は薄板のブレースに孔があいているケースもある。地震時の天井慣性力が流れた場合にこの部分で破断する可能性が高く、2011年東日本大震災の損傷した天井にも非常に多くみられたケースであった。

吊りボルトを介してブレースを固定する場合は、機械的な接合金物を採用し、吊元スラブ面に対し極力押しつけて（クリアランスをなくして）施工することが大変重要である。

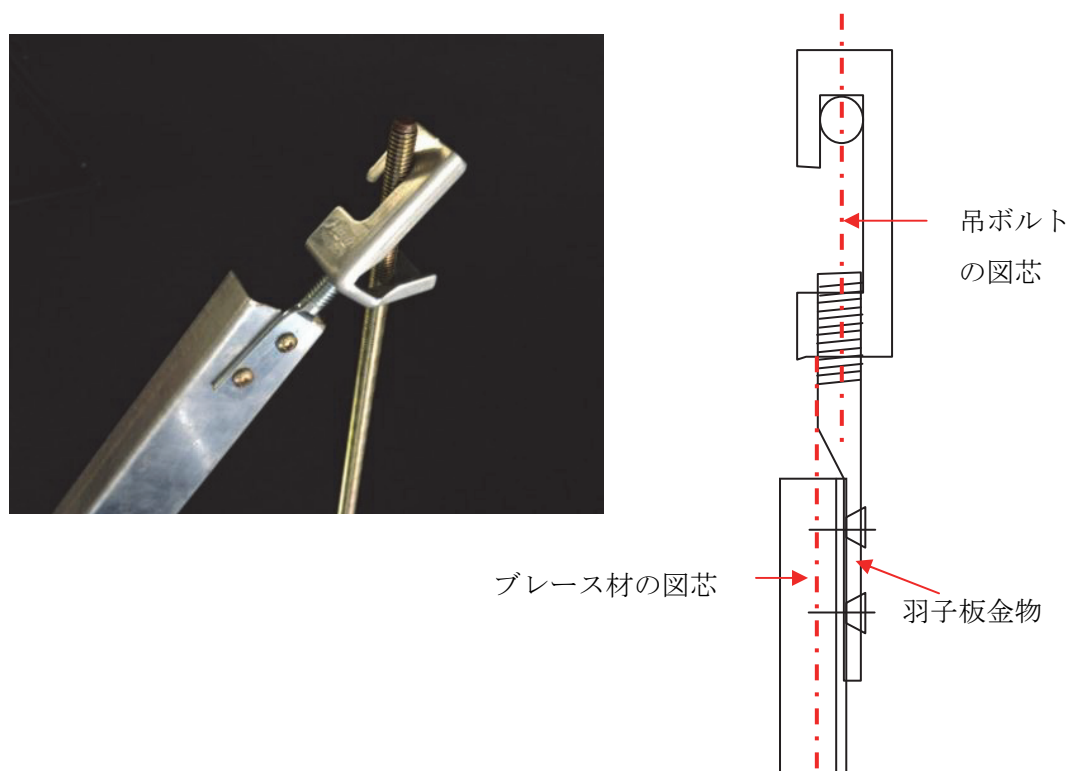
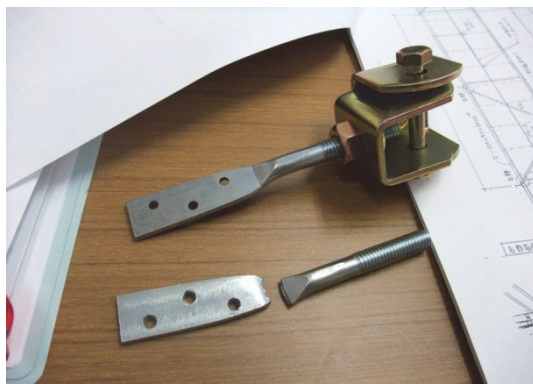



図 3.2.3.7　汎用的なブレース金物と図芯のずれ

2011年東東日本大震災で，使用していた約700か所のブレース接合金物のうち，400 か所以上で写真のような破断が生じた。金物は 1.0G 分の水平力に対し許容耐力内である事を事前に確認していた。

（岩手県　震度6弱）

図 3.2.3.8　東日本大震災でのブレース接合部の破損事例

なお、耐震ブレースホルダーなどと称する補強金物を複数実験[3]してみたところ、一定の曲げ強度を有し、不可避的な偏心の影響を軽減可能な性状を持ち、ブレース上部での接合耐力を保有する金物が存在し、一部の金物は既に量産化されていることが解っている（図3.2.3.9)。

このうち一部の金物は、吊り元でボルト締め込みやビス止めという作業を伴う。この場合，吊元付近での高所作業が必要となり著しく施工性を低下させるため，天井面付近から吊り元に固定可能な金物の開発が待たれた。現在では複数社よりこのような要求を満足する金物が発売されるに至っており，今後ますます普及していくことを期待する。

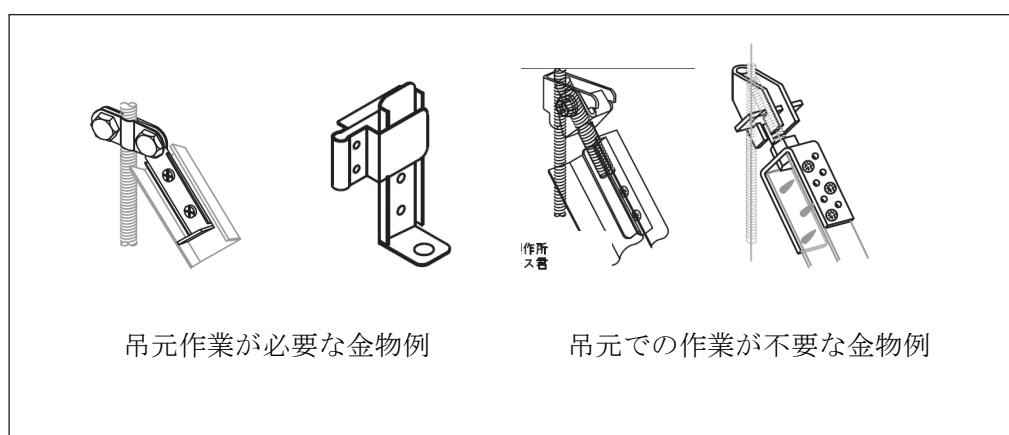



図 3.2.3.9　ブレース接合金物の例

(4)　２段ブレースの注意点

大きなふところの天井でブレースを多段で構成する場合には、容易に耐震性を喪失する部材の変形が生じやすいため、力の流れに応じたより慎重な部材選定、構成が求められる。

ふところが大きな天井などに採用されている多段ブレースについて，鈴木らが行った実験結果[3)]などから重要な注意点が見出されているので紹介する。

なお、3.2.2 項の末に記載された類似のブレースは吊ボルトの圧縮補剛を目的としたものであり、当章で記している天井慣性力に抗するためのブレース補強とは主旨が異なるので注意されたい。

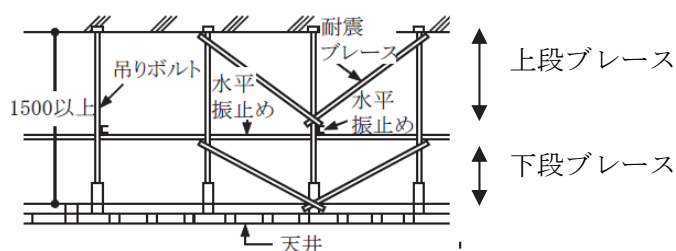



図 3.2.3.10　多段（2 段）ブレース参考図

このような組み方をした天井に水平力を加力すると，圧縮方向に脆弱な吊ボルトの座屈により天井面に上下動が発生し，天井下地が容易に損傷する(図 3.2.3.11)。また，特に上段のブレースの接合部はその下端を吊ボルトや水平振れ止めに固定をする場合が多く、このブレース接合部に軸力が流れた際に接合部が回転を伴う変形を起こしやすいためブレースの有効座屈長さが長くなり，容易にブレースが座屈し天井全体に大きな変位が生じ，周囲との衝突などを引き起こし損傷する(図 3.2.3.12)。また，うまくブレースに軸力が流れた際にもブレースと水平振れ止めの交点が，ブレースの面外にはらむように変位する現象が生じやすい。この場合にもブレースの有効座屈長さが非常に大きくなり，容易にブレースが座屈する。

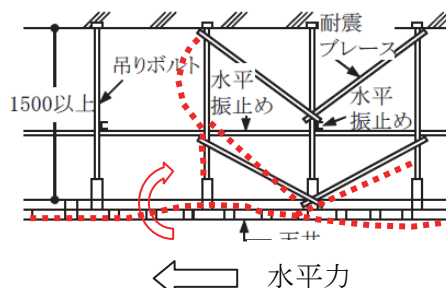



図 3.2.3.11　2 段ブレースに水平力を加力した際の変形モード①

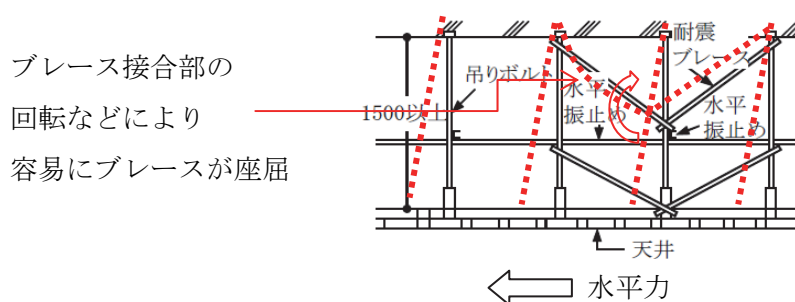



図 3.2.3.12　2 段ブレースに水平力を加力した際の変形モード②

こういった構成の下地で天井を損傷制御するには，必要な圧縮力を負担できる部材で吊り部材やブレースを構成し，かつブレースと水平振れ止めの交点の面外変位防止対策を設置するなどの補強が必要となる(図 3.2.3.13)。この場合も天井面のクリップ，ハンガーの補強やブレース接合金物などは図 3.2.3.2～3 で紹介した強度の高い部品を採用しなくてはならない。多段中間のブレース接合部は吊りボルトに摩擦接合などを用いて緊結するのではなく、確実な力の伝達経路を形成するため、中間の水平継ぎ材にビス固定する（図 3.2.3.13）などして力の伝達を確実に行う。

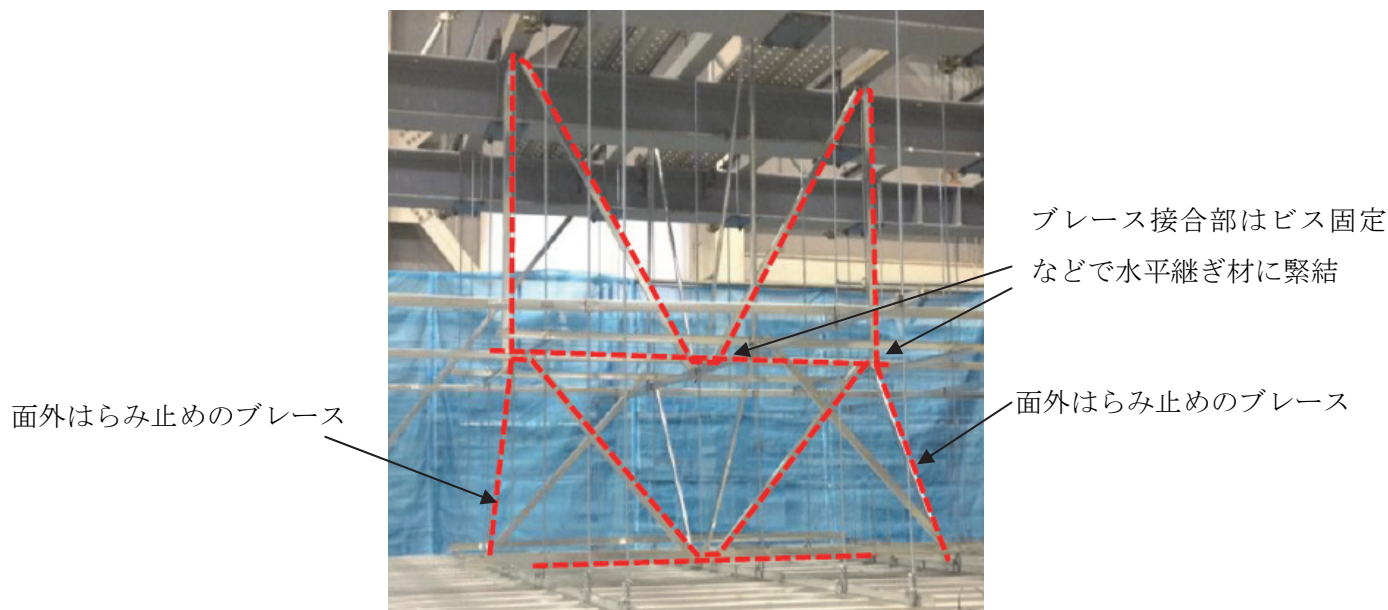



図 3.2.3.13　多段（2 段ﾌﾞﾚｰｽ）の補強例
（点線部分：圧縮材として C-40×20×1.6 等で構成。
ブレース構面が面外にはらまないように同材で変形
防止のブレーシングも実施した。実験で質量 20kg/m2
で天井面加速度 1.0G 程度まで弾性挙動を示した例。）

このような損傷制御方法は，安価で手早く天井を仕上げる在来軽天下地天井の存在価値に対し，非常にバランスを欠いた手間のかかる工法となるため，図 3.2.3.14 に示すような大きな V 字でブレースを設置し，ブレース長さに見合った部材を選定するほうが力の流れがシンプルで、設計や施工管理も容易になり品質確保が容易になる。注意点は，設計段階で天井内設備との干渉防止を入念に行うことと，採用する接合部や金物の特性に合わせた有効座屈長さ，有効細長比などの特定によるブレースメンバー選定を行うことである。

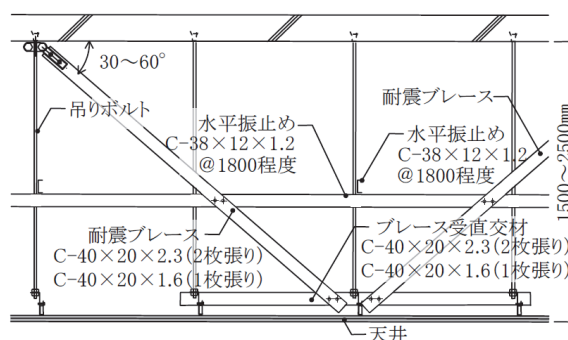



図 3.2.3.14　V 字ブレースで計画した大きなふところの天井下地計画例

(5) ぶどう棚の設置

ふところが非常に大きな天井で多段ブレースで損傷制御が困難な場合や、吊元に傾斜や段差があり天井の吊長さが異なる場合、折板屋根のように吊元に構造的な耐力が期待できない場合等は、天井ふところ内にぶどう棚を準構造として設置し、天井の吊元とする。

鈴木らが実施した実験[3)]では、質量 20 kg/m²の天井に対し吊長さ 2.5m 程度までは軽量鉄骨下地にて水平震度 1.0G 程度まで損傷を制御できた。要求性能や下地の構成、ブレースメンバーによっても吊長さの限度は異なってくるが、一定の吊長さ（ふところ寸法）を超える天井は準構造としてぶどう棚を計画し、ぶどう棚下部を吊元とした吊天井を構成する。このことにより、在来軽天の吊り長さを短くでき、実験の知見や計算等により制御しやすい天井構成とすることができる。

なお、ぶどう棚をブレースで振れ止めし建物本体から質点として吊った場合は、ぶどう棚自体の地震動に対する応答性状に注意が必要である。本体から受ける地震時の外力により、ぶどう棚面の加速度応答倍率が非常に大きくなる場合があるためである。この場合、ぶどう棚の最下部付近で本体鉄骨に緊結する梁要素を加えることで、質点的な挙動を抑制し発生する応答加速度を抑制することが可能である。また、ぶどう棚下面は極力剛床として評価可能な構成とすることで、ぶどう棚面（在来軽天吊元）の複雑な挙動による吊天井

下地への影響を低減することが可能である。

準構造であるぶどう棚による天井構成は、勾配屋根や吊元スラブに段差がある場合にも有効である。天井吊長さが同一天井内で異なる場合には、吊長さの違いによる同一天井系内での固有周期の差、水平変位に対する吊ボルト等の変形角の差などが生じ、天井下地材や接合部に予測が困難な応力が生じ非常に損傷を受けやすくなる。ぶどう棚で吊元を構成することで、その下の在来軽天の吊り長さを一様に計画することが可能となる。

また、屋根に使用されている折板や ALC などに不用意にフック状の金物などで天井吊ボルトを設置すると、地震時の外力に対し折板や ALC の母材損傷による天井全体の脱落の懸念があるほか、常時の風による屋根面(＝折板等の天井吊元)の振動や変形の影響を天井下地が受けることとなり、地震時以外の天井脱落にもつながりかねない。このような場合も、ぶどう棚で吊元を確保することにより懸念事項の払しょくが可能である。いずれの場合も、天井自体は人命保護を確実に実現しなくてはならない。

(6) クリアランスを設ける場合

天井端部にクリアランスを設ける場合には、天井の想定変位と躯体の層間変位を合計した十分なクリアランス寸法を確保する。

地震時に天井が揺れ、周囲の壁や柱、構造体に衝突することを避けるため、クリアランスを設けることがある。

この場合には,天井の想定変位量と躯体の層間変位量を合計したク十分なクリアランス寸法を設ける。仮に、天井が想定外力に対し 50 ㎜変位する場合（鈴木らの実験[3)]により計測されたふところ 1500 ㎜の場合の水平変位の参考値)、同外力に対し躯体の層間変形角 1/100 程度が想定されるとすれば,天井ふところが 1500 ㎜である場合,

50 ㎜＋（1500 ㎜×1/100）=65.0 ㎜

以上のクリアランスを設ける必要がある。

ただしクリアランスが機能を果たすのは、天井付近に生じる地震時の慣性力が想定範囲内の場合であって、想定を超える外力に対しては、クリアランスが不足し天井端部が周囲の構造体と干渉・衝突する可能性がある。端部の損傷を起点とする天井連鎖崩壊によって機能が喪失することを防止する対策（接合部補強など）やフェイルセーフ機構の採用により、確実に人命を保護するなど、想定以上の地震動に対する安全確保を併せて検討しておく必要がある。

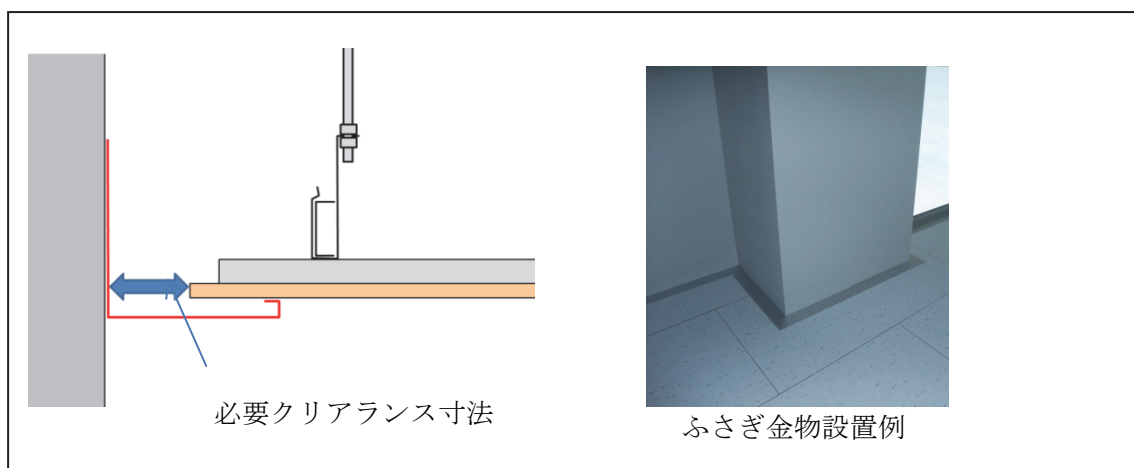



図 3.2.3.15　天井端部に設けたクリアランスの設置例

(7) クリアランスを設けない場合

天井端部にクリアランスを設けない場合は、地震時に天井に生じる慣性力を周囲の壁や柱、構造体で負担できることを確認し、かつ天井が周囲の部位からの反力を受けて面内座屈しないように設計する。

クリアランスを設けない場合は，天井面および周囲の構造の安定性確保が重要である。天井面の安定性については元結らの挙動解析[1]（3.2.2 項参照）が参考となる。吊ボルトの有効座屈長さや有効細長比を短く小さくすること，局部的な応力集中をさせないこと，周囲の構造が天井面内から伝達される慣性力に十分抗すること，が肝要である。

また、ケーブルや鋼材などを使って、天井周囲の構造体から天井の支持を行う場合は、ケーブルや鋼材を引張材として計画（4.2 節参照）することで地震時の天井変位を非常に小さく抑えることができる[6]。

このような場合にも天井周囲のクリアランスは、機能維持の観点からは必要が無い。

(8) システム天井の注意点

システム天井を採用する場合は、天井下地材の構成や動的応答性状をよく理解し、適切な人命保護対策を実施したうえで、機能維持・損傷制御を検討する。

システム天井のほとんどが「グリッド型」と「ライン型」の 2 種類に送別できる。それぞれの特徴と注意点を下記に整理する。

グリッド型システム天井

当工法はおおむね 600 ㎜×600 ㎜をモデュールとした部材で構成される。「親バー」と呼ばれる通し材（T バー）に対し、はじご状または千鳥に「子」、「孫」と呼ばれるバー材（T バー）を緊結し、天井材を乗せかけるグリッド状の天井下地を構成する。親バーおよび親バーに対する子、孫バーの接合耐力が十分である場合は、在来軽天よりも X、Y の方向による動的性状の違いが出にくい工法である（図 3.2.3.16）。

業界団体の標準仕様[7)]が定められているが、JIS 規格等の詳細仕様は現在制定に向けて整備中の段階にある。

機能維持のためのブレース計画や接合部耐力評価等は、適切な実験（静的加力のみでなく繰返しや動的実験による。3.2.2 項参照）に基づく知見で評価することが重要である。特に T バーや付属する設備機器等の脱落防止対策が不十分な商品も見受けられるため、事前の確認と適切な実施を怠ってはならない。また、部材の接合方法や接合耐力もメーカーにより異なるため、同様に適切な実験による評価が必要である。

天井材は岩綿吸音版やグラスウールボード等の比較的軽量な材料が使用される。天井材に軽量柔軟な材料を用いている限りは、脱落による重篤な人災の可能性が低いという特徴がある。ここでも安全性評価法により天井材の選定を行うことが有効である。

図 3.2.3.16　グリッド型システム天井

ライン型システム天井

当工法は照明および音響、防災、空調設備を一つのライン上に構成し、このラインの間に天井材を 2 辺支持的にかけ渡すことにより天井を構成する。

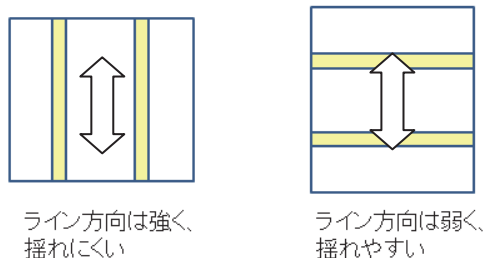
ラインの間隔は建物の柱スパンなどにより任意で設定され、概ね 1,800 ㎜程度～3,000 ㎜程度のものが多い。

ライン方向に T バーを流し、そこに天井材や照明・設備等を乗せかけて支持する。天井材は岩綿吸音版が多くつかわれるが、２辺支持の構成となるため自重でたわむことを防止するため、天井材と天井材の間に「H バー」と呼ばれるたわみ制御材を挟み込む場合が多い。H バーは鋼材やアルミ材が多くつかわれ、一部樹脂材も見受けられる。また、適切なピッチで天井点検口が設定されるが、岩綿吸音版の周囲にアルミ見切材を取付けたものを点検口としている。

ライン方向とその直交方向とで方向依存性が非常に強く、ライン直交方向には脆弱である（図 3.2.3.17）。そのため、地震時の天井慣性力により T バーが天井面内で変形し、２辺支持である天井材がかかり代を失って脱落しやすい。ライン直交方向の剛性を高めるため、T バー上部に水平の継ぎ材を設ける場合もあるが、T バー自身の回転挙動が止められないため、根本的な脱落防止対策が困難な工法である（図 3.2.3.18）。また、H バーにより補強された天井材やエッジ保護のため鋭利な部材で補強された点検口の脱落による人災リスクは、グリッド天井に比して高い。そのため、ライン型システム天井を採用する場合は、落下防止対策を併用する必要がある。

①地震時の揺れに対し、ライン方向とライン直交方向で剛性が大きく異なる

ライン方向は強く、
揺れにくい

ライン方向は弱く、
揺れやすい

②ライン直交方向の地震の揺れで、照明ラインが開くと天井板が落ちやすい

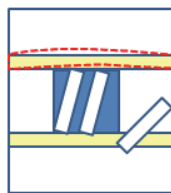



図 3.2.3.17　ライン型システム天井の特徴

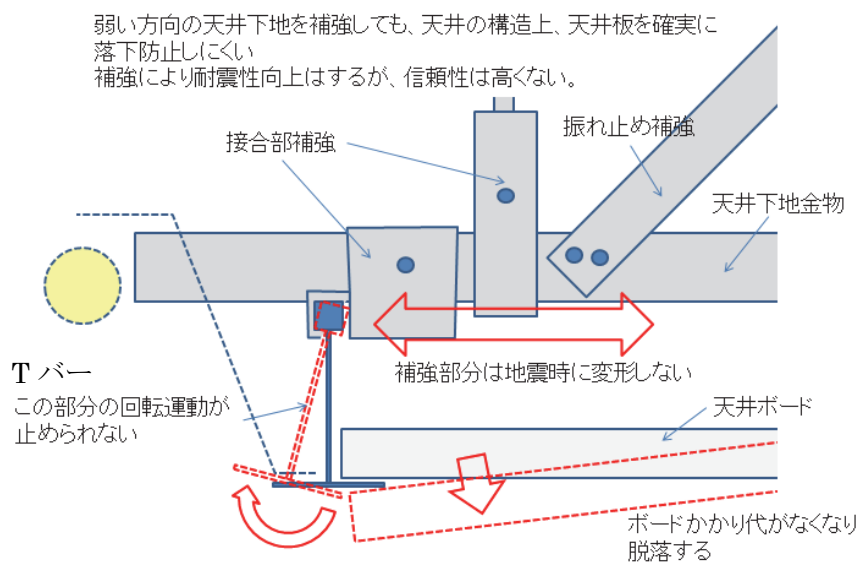



図 3.2.3.18　ライン型システム天井補強の注意点

3. おわりに

当章の前段では、JIS A 6517 材等を使用した在来軽天工法における機能維持上の様々な課題について言及した。ここで述べたとおり、生産性、施工性を重視した工法であったため、地震時の天井に生じる慣性力の処理について必ずしも合理的な形状や構成を取っているものではない。主材断面を見て解る通り、材自体に不可避的な偏心が存在する。同時に、野縁、野縁受け、その直交材、ブレース、吊ボルトへと重心位置から離れた点に水平力に抗するための支持点を置かなくてはならないため、常に曲げや回転モーメントを受ける構成となってしまう。また、使用する材が薄板であることから、接合部強度の確保に様々な課題が多い。それらを使いこなすには、多岐に渡る深い知見を必要するのが現状である。

このように地震時の機能維持および損傷制御のためには、多大な労力をかけて繊細かつ慎重な設計・施工をしなければならない工法であり、当工法で落下事故防止を実現しようとすると、本来目指してきた「生産時、施工時の合理性の高い工法」の主旨と矛盾する結果となる。本ガイドラインに従った確実な人命保護の実現がまず必要である。

大量に普及している汎用性の高い工法のため、早急な新工法への置き換えは困難が予想されるが、より平易な検討と管理で確実な脱落防止性能、機能維持性能が発揮できる「次世代天井下地」の開拓が業界全体の重要なテーマであることが解る。これらの工法の開発が早期に進み、より安全安心な天井下地として普及していくことを期待する。

参考文献

1)　元結正次郎：2012 年度日本建築学会大会研究協議会予稿「非構造部材の安全性評価および落下事故防止特別調査」

2)　中本康，グエンタンサン，元結正次郎，吉川昇，中川祐介：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究（その 1～3），日本建築学会（関東）大会学術講演梗概集 B1　p.843～847　2006.9

3)　鈴木健司 金子美香 半澤徹也 神原浩 櫻庭記彦：鋼製下地在来構法天井の耐震性能に関する実験的研究，日本建築学会シンポジウム「東日本大震災からの教訓、これからの新しい国つくり」一般講演資料 2012.3

4)　日経アーキテクチュア　2012-3-25 天井は「軽く、柔らかく」　P58～60

5)　小澤祐周，川口健一：非構造材落下防止ネットの力学と形状に関する基礎的考察，日本建築学会　構造工学論文集　Vol.56B（2010 年 3 月）

6)　櫻庭 記彦，　金子 美香，鈴木 健司，内本 英雄，田中 栄次：既存天井の後付け改修用「グリッドサポート構法」の開発：清水建設技術研究所報　2013

7)　ロックウール工業会：「システム天井新耐震基準」　2011.9 月改定

3.2.4　各種劣化制御

天井等の非構造材はその置かれる様々な環境により、必要に応じて各種劣化制御を行う。

一般的な天井材料は水に長時間浸漬すると 80%程度の吸水があり、その時の強度は２分の１程度に低下する。従って、高温多湿空間における天井材は透湿抵抗の高い材料とし、水蒸気の天井裏への侵入を防止するとともに天井裏での結露を防止する必要がある。

また、外部の軒天井などは外装と同等の耐風圧設計が必要であり、更に風の圧力変動でクリップなどが疲労破断しないように配慮する必要がある。

1. 天井材料の特性

(1) 通常、天井に使用されている天井材料としては以下の材料がある。

・ケイ酸カルシウム板
・ケイ酸カルシウム板エコ品　（再生せっこう混入）
・フレキシブルボード
・オートクレーブ養生したフレキシブルボード
・せっこうボード
・シージングせっこうボード（防水せっこうボード）
・エフジーボード

(2) 吸水率と強度

せっこうボードは JIS A 6901 で含水率 3%以下、吸水率は 10%以下となっている。この吸水率は水中に２時間浸漬での基準値であるが、ある実験によれば、JIS A 5430 に準拠して水中に 24 時間浸漬すると、せっこうボードの吸水率は 80%強、シージングせっこうボード（防水せっこうボード）でも 60%程度の吸水率となった。更に、吸水したせっこうボードについては長さ 1000㎜ に対し 3㎜ 程度の伸びもみられた。エコ品を含むけい酸カルシウム板では 70%以上と高かったが、フレキシブルボードは 20%程度、エフジーボードも 30%弱とかなり低い数値となった。あわせて、シーラー処理の有無も実験したが、吸水率にはほとんど差がなく、吸水防止効果は期待できないことが判明した。

これらの材料について、湿潤状態と乾燥状態でビスの引き抜き強度試験を行ったところ、せっこうボード、シージングせっこうボードはともに強度比が 1/4 程度に低下した。ケイ酸カルシウム板、フレキシブルボードも 1/2 程度の強度低下がみられた。エフジーボードは吸水率が 30%弱と低いにもかかわらず強度比が 1/4 程度となった。また、フレキシブルボードについては温冷繰り返し試験を行うと大きくひずみが出ることから、使用する場所の熱環境によっては割れることも予測できる。

以上のことから、水分が長時間継続的に供給される環境では、天井材料の重量が増大す

るばかりでなく、強度の低下、伸びの発生によりボードの取付ビス廻りが非常に危険な状態となる。このような現象は温水プール、温浴施設などの結露水のほか、漏水によっても同様な状況となる。

2. 湿度等による劣化の対策

温水プール、温浴施設など高温多湿空間では、天井裏に高温多湿な空気が流れ込むと、冷たい躯体面などに結露し、継続的に結露するとこの結露水が天井面に滴り落ちる。天井の下地にせっこうボード等を使用していると、せっこうボードが滴り落ちる結露水を吸収して、前述の通り、天井重量は増大し、反対にビスの引き抜き強度が低下し、さらに伸びることでボードのビス廻りに大きな負担がかかり、非常に危険な状態となる。

プールの天井としてせっこうボード下地の表面に断熱パネルを張っていた天井で、せっこうボードが結露水を吸収して、重さに耐えきれず脱落する事故が発生している。また、せっこうボードばかりでなくケイ酸カルシウム板でも同様の事故が起きている。

(1) 高温多湿な空気の天井裏侵入防止

湿度による劣化防止策としては、まず第一に、天井裏に高温多湿な空気が浸入することを防止することであり、天井面の気密性を確保することである。プール天井用の材料で気密性を取ることを目的とした材料も市販されているが、図 3.2.4.1 のように天井材の中間に不透湿層を挟み込む方法もある。また、図 3.2.4.2 に示す通り、温水プールなどでは殺菌の為に使う塩素が塩素ガスとなって水蒸気とともに上昇する。この塩素ガスにより天井の軽鉄下地は勿論、鉄骨造の場合は躯体鉄骨が腐食するので、しっかりと気密性を確保することが重要である。躯体を含む鋼材については塩素ガスが無くても、相対湿度 70%を超える条件下では耐火被覆の内部にある鋼材でも継続的な腐食が進行することが確認されており、万一に備えて鋼材の防食処理もしっかりしておく必要がある。

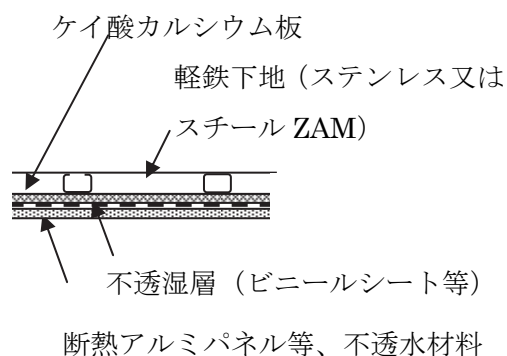



図 3.2.4.1　湿度による劣化の防止例

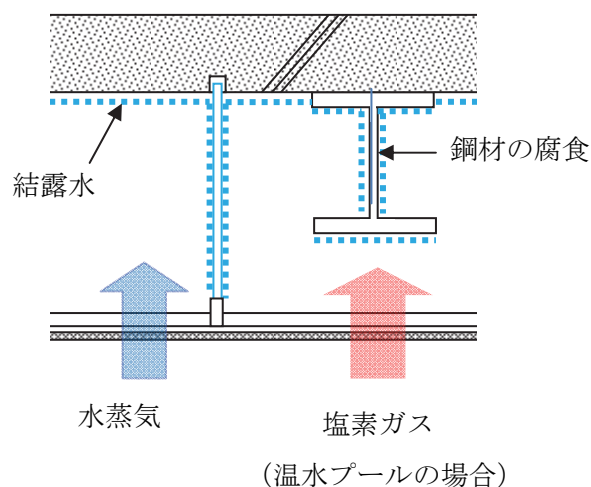



図 3.2.4.2　温水プールにおける状況

天井軽鉄下地についてはステンレスまたは、スチール製高耐食溶融めっき鋼板 ZAM（亜鉛-アルミニウム 6%、マグネシウム 3%のメッキ層をもつ溶融亜鉛めっき鋼板）等とすることが考えられる。

また、天井と取り合う設備器具周りから水蒸気が天井裏に浸入して結露事故になる場合もある。一般の天井埋込み型の照明器具は熱気を天井裏に逃がす構造となっているため、高温高湿が予測できる空間では防水型直付けとして天井面での気密性を確保できる設備とする必要がある。

しかしながら、天井面全体を完全に気密にすることは極めて困難であり、天井裏を加温空気で加圧し、天井裏空気の滞留、室内から天井裏への漏気を防止することが望ましい。また、当然であるが結露防止の観点から、時間外でも適正に運転する必要がある。

(2) 天井裏の結露防止

第二に、屋根の直下に設けられるこのような空間については、結露防止の観点から天井裏躯体面の断熱も重要である。屋根面は中間期でも放射冷却により冷やされるため、屋根面自体を断熱することは勿論であるが、吊りボルトもコールドブリッジとなる危険性があるので、図 3.2.4.3 に示すように吊りボルト自体の断熱、また、インサートに断熱インサートを使用する等の配慮が必要となる。

この他、外壁と屋根取合い部、外壁と内壁の取合い部での断熱材の折り返し、屋根面で断熱する場合は図 3.2.4.4 に示すように屋上設備機器等の基礎の直下等で断熱材が欠損する部分などはコールドブリッジができることに注意する必要がある。コンクリートと断熱材の熱伝導率は 30 倍程度異なるので、コンクリートの厚さに期待するのは非常に危険であり、室内側からの断熱材設置が必要となる。

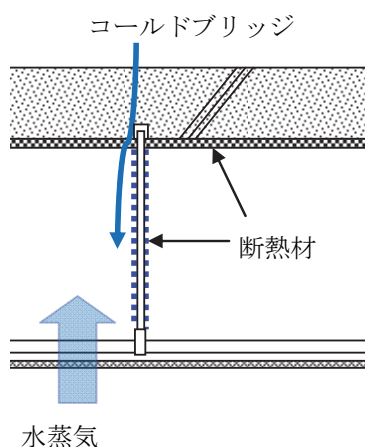
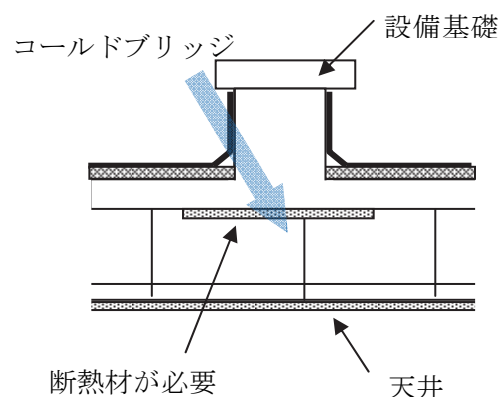
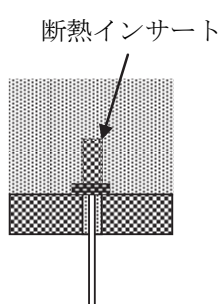



図 3.2.4.3　金具周りのコールドブリッジ　　図 3.2.4.4　外断熱の断熱欠損部

第三に、万一高温高湿な空気が浸入した場合を考えて、換気設備により浸入した高温高湿空気をすみやかに排出することが必要である。しかしながら、天井裏の換気を安易に自然換気としていた建物で、台風接近時に天井裏に強風が入り込み、風圧で天井が落下した事例がある（図 3. 2. 4. 5）。自然換気とする場合はガラリ面積が大きくなるので、天井下地を屋外用下地として耐風圧性能を検討しておく必要がある。また、結露面が天井面となることから、不透湿層をできるだけ高湿側に近く設置する必要があることにも注意する。

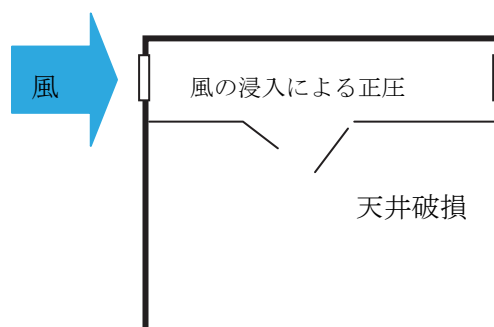



図 3.2.4.5　天井内の圧力

確実で安全性が高いのは機械換気であり、上述の通り加温空気により空気の滞留を防止しながら加圧を行うのがベストであり、過度な風圧の制御を行うと同時に、温度、湿度、結露センサーによる自動運転制御をかけて時間外にも適切な運転をすることがより安全で有効であると言える。

3.　軒天井等の耐風圧

軒天井、庇裏の天井など、外部に設ける天井については、設計で耐風圧についての検討がされておらず、施工者任せとなっている場合が多い。

風圧は静止流体ではないが、パスカルの原理を準用すると、図 3. 2. 4. 6 の通り外壁面と同等の圧力を受けることとなり、法令（注 1）に基づく耐風圧性能が求められることとなる。天井ボード類の耐力は計算にはのらないので、通常は野縁で天井面の耐風圧を確保し、野縁受け、吊りボルトで力を躯体に伝達することで耐風圧設計を行っている。高層建物での風圧は 2000～3000Pa 以上となる。外部用の野縁の採用、ピッチの検討が必要である。また、吊りボルトは座屈に弱いため、設計荷重に合わせて吊りボルトの補強、または本数の増設など、耐力的に余裕をもった設計が必要となる。図 3. 2. 4. 7 は縦軸に吊りボルトの圧縮強度、横軸に天井懐寸法を想定したグラフで、荒井智一ら

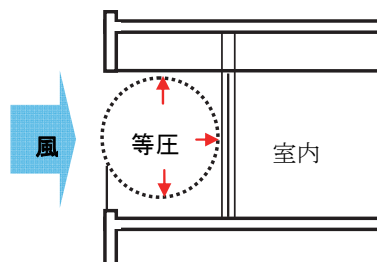



図 3.2.4.6　軒天井に作用する風圧

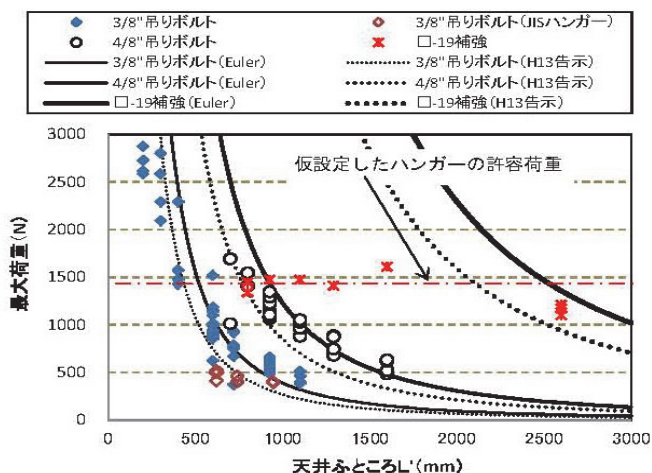
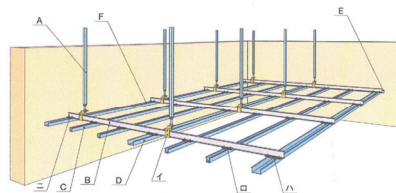



図 3.2.4.7　吊りボルトの座屈耐力
（学会研究論文より）

の研究で、両端ピン支持で吊りボルトの座屈強さを実験した結果である。また、図 3.2.4.8 は某施工メーカーの耐風圧天井仕様で、2000Pa～4000Pa まで対応するメンバーとピッチが決められている。

また、軒天井は室内空気が天井裏に流入すると結露するので、天井裏を室内と遮断するか、または結露対策をする必要がある。下地鋼材の防錆処理が必要なのは言うまでもない。

耐風圧2000N/m²～4000N/m²対応仕様（N-38.6を使用の場合）

部材名＼風圧力	2000N/m²仕様	2500N/m²仕様	3000N/m²仕様	3500N/m²仕様	4000N/m²仕様
インサートピッチ	900×900mm以下	800×800mm以下	700×700mm以下	650×650mm以下	600×600mm以下
野縁受ピッチN-38.6	900mm以下	800mm以下	700mm以下	650mm以下	600mm以下
野縁ピッチND-Sバー	300mm以下	300mm以下	250mm以下	250mm以下	250mm以下

※N-50を使用するタイプもありますのでお問い合せください。※圧縮材は懐寸法により異なります。

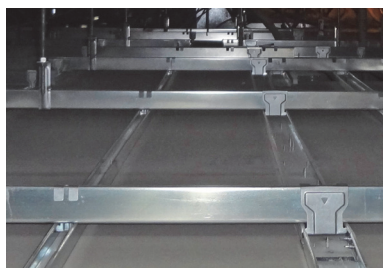
図 3.2.4.8　メーカーの耐風圧天井下地の例

4. 風による圧力変動

前段では風の力を静的な力として耐風圧抑制について述べたが、実際の風には強弱があり、軒天井などには圧力変動による正圧と負圧の繰り返しの力が加わる。

2011 年 6 月に新幹線の駅の天井約 200kg が突然落下したが、これは新幹線通過の際に発生する風による繰り返しの力を受けて野縁と野縁受けを接合するクリップが疲労破壊したのではないかと考えられている。

図 3.2.4.9　落下した天井
（学会研究論文より）

遠藤徹らの研究によると新幹線通過時の圧力変動は 368Pa 、仕上材質量は 9.8kg/m²、クリップ長辺方向@900mm、短辺方向 380mm で、クリップが負担する荷重は 1 か所当たり 160N。この力で 50 年相当の 582,000 回の圧力変動を加える実験を行ったが、クリップの破断には至らなかったとの結果が出ている。しかしながら、260N では約 75,000 回、年換算 6.4 年、390N の圧力変動では約 4,700 回、年換算 0.4 年でクリップが破断している。駅舎の天井はスパンドレルで下地を入れても在来天井より軽量であり、１階から２階のコンコースに抜ける天井であるのに対し、一般的な軒天井で使われているケイ酸カルシウム版、厚さ 6mm+8mm で質量は 13 kg/m²、高層階ではちょっとした台風でも 1000Pa を軽く超える風圧を受けることになり、野縁受けピッチ、野縁のピッチを小さくして、クリップ１か所当たりで負担する荷重に十分余裕を見て設計しておく必要がある。

健全なクリップ

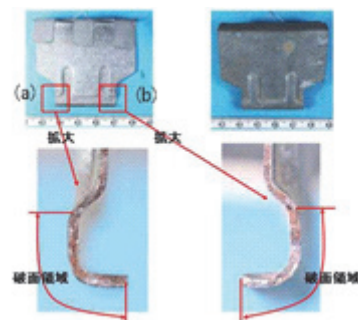



図 3.2.4.10　健全なクリップと破断したクリップ
（学会研究論文より）

必ずしも密閉型の天井が必要でない場合には、適度に風を逃がす材料など、安全性評価を満たす範囲で、それぞれの設置環境により適した材料を賢く選定する必要がある。

（注 1）風洞実験によるか告示第 1458 号「屋根ふき材及び屋外に面する帳壁の風圧に対する構造耐力上の安全性を確かめる為の構造計算の基準を定める件」による。

参考文献

1)　荒井智一他：鋼製天井下地材の強度、剛性に関する研究：その 2：吊りボルトの圧縮強度試験
2)　遠藤徹他：列車通過時の圧力変動を受ける駅天井下地材に関する研究：その 1：クリップの観察
3)　在家善之他：列車通過時の圧力変動を受ける駅天井下地材に関する研究：その 2：圧力変動の測定およびクリップ材の疲労試験
4)　オクジュー総合カタログ電子版

3.2.5　設備機器との取合い

天井懐内やその周辺に設置される設備機器は、建築計画段階から耐震その他の損傷制御に配慮した納まりとし、設備機器の脱落が人命に影響を及ぼさないようにする。設備機器が天井やその下地と互いに干渉し損傷落下が発生することのないように対策を講ずる。

天井面、天井裏に人命保護に影響のある重量の設備は極力設置しないようにすることが望ましい。設置する場合には本節で述べるような対策を講じて設備機器の落下を防止する。天井に関連する設備は計画段階から設備機器等の耐震、納まりに配慮した建築計画とする必要がある。設備機器の損傷脱落が人命保護に影響を及ぼしたり、下地を含む天井との取り合いで互いに干渉し、設備機器や天井の損傷落下が発生しないように対策を講ずる。

また、別途工事、工場プラント、商業テナントなど、また、将来変更が予測される設備工事について、設計者は人命保護の確保と合意した機能維持の実現のための基本的な考え方を所有者または発注者に伝達し、所有者または発注者は継続的な人命保護と合意された機能維持を図る必要がある。

1. 建築計画と設備の整合

意匠設計者は天井内設備にも配慮した建築計画とすることが必要である。効率を重視した結果、PS を極端に狭く、かつ離れて配置した結果、PS の周りの天井裏がダクトや配管で満杯となり、天井の吊りボルトも設けられない設計となっている場合がある。

天井の設計では、BIM を活用することによって特に天井フトコロ内の計画を可視化し、設計者が天井内部の設備機器やダクト、配管等の配置を把握し、建築と設備の取り合いをしっかりと調整し、適切で安全な天井を作るのも一つの方法である（図 3.2.5.1）。また、BIM は、複雑な天井フトコロ内を可視化することで発注者、設計者、施工者など関係者間で情報を共有することが可能となる。今後、天井落下防止対策の重要性を関係者へ伝達することを含め、BIM の有効活用が望まれる。

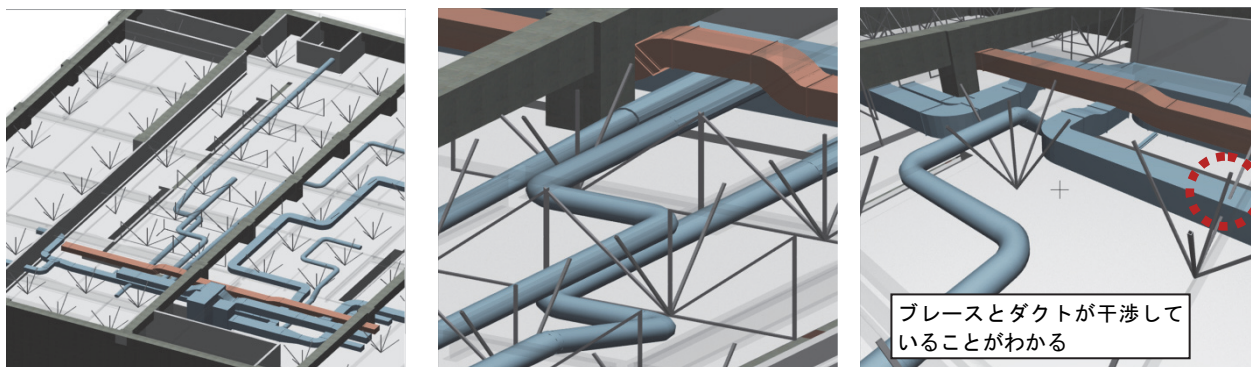



図 3.2.5.1　BIM による天井フトコロ内の検討例

ただし、整合のとれた設計をするのはあくまでも設計者であることを忘れてはならない。将来的なメンテナンスも含めて、設備設計者に無理な設備計画をさせない建築計画とすることが人命確保の天井作りには欠かせないことである。

2. 天井に関係する設備機器

天井に関係する設備は天井面に取り付く設備と天井内に隠蔽される設備の２つに分けられる。これらの設備は双方とも落下防止を行うことは勿論であるが、設備同士の衝突、設備と天井との衝突による破損、落下も合わせて防止する必要がある。

(1) 天井面に取り付く設備

(ⅰ) スピーカー等

天井面に取り付く設備で天井と一体となって動くことができる軽量で軽微な設備、例えばスピーカー、自動火災報知設備、ダウンライトなどは万一の落下を防止する為に、落下防止ワイヤーなど設置し、人の活動領域以下に落下しない措置を講ずる。ただし落下防止ワイヤーは長くすると衝撃力が増大してしまうので必要以上に長くしないこと。

(ⅱ) スプリンクラー

スプリンクラーヘッドは配管で位置が固定されている場合、地震時に天井と衝突し、お互いに損傷する危険性がある。

スプリンクラーは特に初期消火用の設備であり、一般建物の場合、スプリンクラー用消火水槽の容量はスプリンクラーヘッド 10～15 個の同時開放で約 20 分の水量をもとに決められている。ヘッドが破損して放水してしまうと、他の区画で実際に火災が発生した場合に水量が不足して火災が延焼拡大する恐れが生じる。従って、スプリンクラーは本管とスプリンクラーヘッドを結ぶ配管をフレキシブル継手とし、天井の動きに追従させることで衝突による破損を回避させなければならない。

(ⅲ) 排煙口

排煙設備も火災時の初期避難には必要不可欠の設備であり、損傷すると初期避難に支障の出る恐れがある。排煙口は法的に鋼製ダクト接続が必要となるため、排煙口と天井の間にエキスパンション機構を設けるか、天井チャンバー方式の排煙として天井と全く縁を切って、天井材との衝突による損傷を回避させなければならない。

排煙口方式　　　　天井チャンバー方式

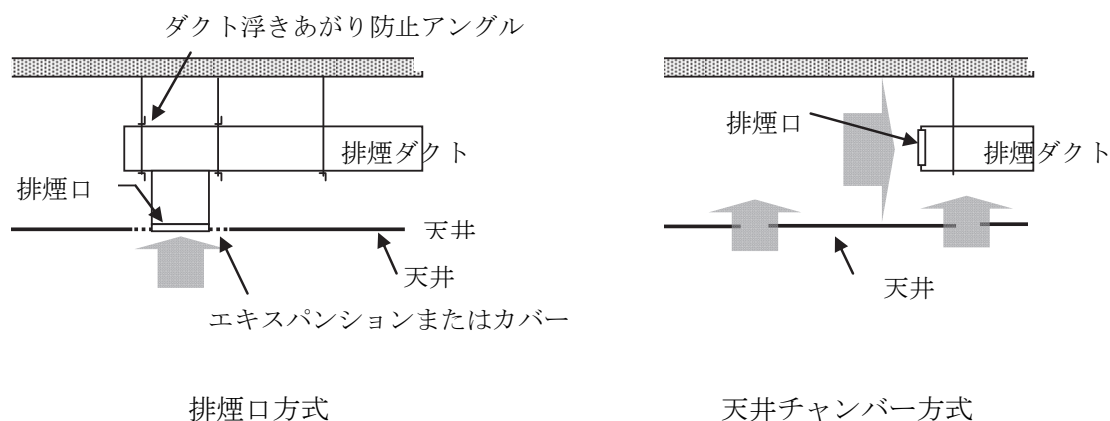



図 3.2.5.2　排煙設備

（ⅳ）制気口

アネモ型やライン型の吹き出し口等もフレキシブルダクトによる接続以外で、鋼製ダクトによる接続の場合、地震時に天井と衝突して破損、落下の危険性があり、空調の制気口は図 3.2.5.3 のようにダクトやチャンバーと落下防止ワイヤーで接続し、人の活動領域以下に落下しない構造とし、更に吊りボルトの破断にも考慮して、チャンバー等も落下防止ワイヤーでスラブ等に固定する必要がある。また、図 3.2.5.4 のように器具と天井との間にエキスパンション機構を設けて天井との衝突を防止する方法もある。この場合、人命保護を確保した上で、合意された機能維持に対して可動量を決定する必要がある。

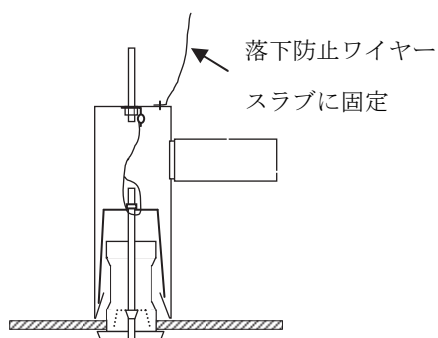



図 3.2.5.3

フェースの落下防止

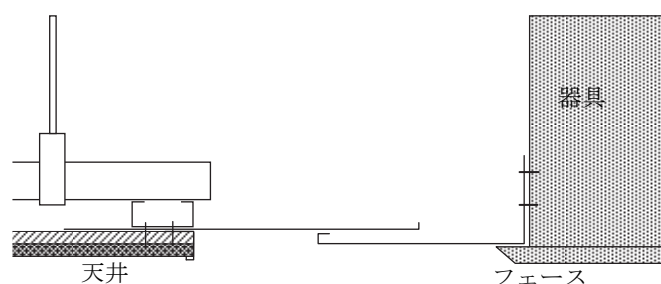



図 3.2.5.4

器具周りエキスパンション（案）

（ⅴ）照明器具

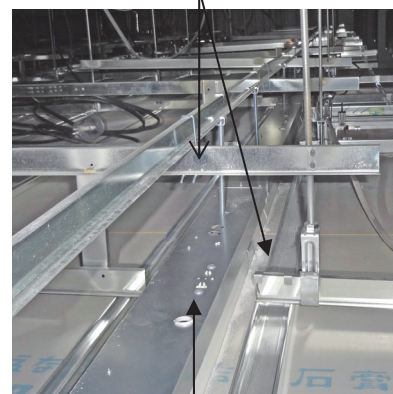
埋め込み型の照明器具は天井の野縁受けを切ることとなる。ライン状に連なると天井下地がバラバラとなり、天井面全体の剛性が極端に小さくなるので注意が必要である。最近ではLEDを使った超薄型で野縁さえも切らずに取り付けられる照明器具もあるので参考にされたい。

図 3.2.5.5
埋込み型照明器具と天井下地

(ⅵ) ブリーズライン（ライン型吹き出し口）

ブリーズラインは照明より更に深刻で、吹き出し口にダクトが接続されており、照明器具と異なり図 3.2.5.5 のような野縁受けの補強も入れられない。天井下地全体に適切な強度が保たれるようにブリーズラインの長さを分割する必要がある。

(ⅶ) その他

この他、オフィスなどではビルマルチ式空調システム、天井吊りパッケージエアコンが主流となっているが、器具自体は 500N 程度あり、地震時の天井の動きに合わせて天井に固定するか、天井に強度が期待できない場合は天井との間にエキスパンション機構をとって、天井と別の動きをしても衝突しない構造とする必要がある。

(2) 天井内設備

配管類、ケーブルラック、天井隠蔽型の空調設備等があるが、どれも人体耐性指標上危険な重量のものばかりである。落下防止ワイヤーなどによる落下防止措置を講ずるとともに、地震時の揺れを抑制して天井吊りボルト、ブレースなどとの衝突によるお互いの損傷、落下を防止することが重要である。

また、上記設備機器を固定する吊りボルトは激しい振幅を繰り返すと容易に破断することが知られている。落下防止ワイヤーなどはスラブ、ぶどう棚などの安全性の高い部位に固定する必要がある。

4. 引き渡し後の設備工事

工場などではプラント設備が別途で建物引き渡し後に工事が行なわれたり、商業施設でもテナント工事で設備が別途工事となる場合がある。引き渡し後の工事を行う設備施工者に対し、設備を含めた天井全体の落下防止措置、機能維持の基本的な考え方を徹底させることが設計者、所有者に求められる重要な事項である。

また、設備は天井よりも更新期間が短いこと、テナントビルなどではテナントが替わる

ことによって設備の変更工事が発生するので、所有者が運用段階でも継続的に設備を含めた天井の人命保護、機能維持を行うことが更に重要であり、設計者は人命保護と機能維持の基本的な考え方を所有者にしっかり伝達しておくことが大切である。

参考文献

1） 震災復興支援協議会「設備被害検討会」東日本大震災による設備被害と耐震対策

3.3　設計の進め方

新築、改修、災害復旧時を問わず、設計者は単に法規を順守するのみでなく、建物を利用する全ての人々の確実な人命保護を実現し、発注者との十分な合意を図りながら、より安全安心な建築空間を実現する。

新築、改修、災害復旧時における設計の進め方は、単に法令を遵守するのみならず、安全性評価法による検証法により、建物を利用する全ての人々の確実は人命保護の実現を最優先とする。さらに、設計者は要求される機能維持の検討を行い、天井工法の選択を行い、その過程で発注者との十分な合意を図りながら、その合意内容を実現する。

特に災害復旧時においては、制度上「原状復旧」が優先される場合が多い。しかし、安易な「原状復旧」は落下事故の再発を招く。従って、安易に「原状復旧」の旧弊に同調せず、必ず安全性評価を行って、確実な人命保護を実現するように努めなくてはならない。

やむなく原状復旧が行われてしまった場合は、安全性評価を行い、必要に応じてフェイルセーフを追加するなどの方法で、人命確保を行う必要がある。

単に法令を順守すれば責任が回避されるという発想ではなく、利用者の立場に立って安全安心な建築空間の実現に努める態度が重要である。

3.3.1 新築･改修及び復旧の進め方

1. 新築時の天井工法とガイドライン

安全性評価法を参考に人命保護を確実に実現した上で、発注者との合意により必要に応じて機能維持を実現する。

ここでは新築時の設計フローとこのプロセスで選択される工法について述べるとともに各章の内容との具体的な関連を明示している。

(1) 新築時の工法選択フロー

設計者は人命保護を確実に実現した上で必要に応じて機能維持を実現する。この際、発注者との意思疎通、合意が重要となる。対象となる室用途（不特定多数利用かどうか)、求められる機能及び性能（音響、遮音)、天井材の素材（重い、軽い、堅い、柔らかい)、天井の高さ、平面形（広さ、長大、曲線状）や断面形（段差、勾配、曲面)、天井の置かれた環境(温湿度、振動)そして設備機器との取合いといった条件を整理し、本ガイドラインにより提示される方法論により、適切な工法を選択する。そのプロセスと各章との関連を表現したものが図 3.3.1.1、具体的に工法を選択するフローが図 3.3.1.2 である。

(2) 新築時の天井工法のパターンとガイドライン

【従 来 型 天 井】: 人命保護のため安全性評価を行い、従来型の天井も選択できるが

【軽量柔軟化天井】: 仕上げ材としての天井材は、軽量・柔軟化につとめる。また、必要な場合はフェイルセーフとして天井下に落下防止ネットや落下防止ワイヤーを設置する。機能維持を目的とした損傷制御の方法としては、耐震性の高い下地の採用や天井懐内の湿度監理を行う工法などもある。

【フェイルセーフ天井】: 安全性評価法で危険と判断される天井材を用いる場合には必ずフェイルセーフを設置し、人命保護を確実に実現する。

【準構造化天井】: 音響性能等の要求から特に重量のある天井を実現する場合は、下地から天井面そのものまでを「準構造」として設計施工し、仕上げ面が必要な場合は安全性評価法を用いて軽量柔軟に設ける。

【直 天 井 化 1】: 吊り天井材を張らず、かつ天井内の設備機器の見え方、補強及び落下防止にも配慮した工法。仕上げ材が必要な場合は安全性評価法により安全な面材を選択する。

【直 天 井 化 2】: 構造梁を PC 化し、照明・空調機器を組み込み高機能化をはかるなど構造部材で天井機能を実現する工法。天井材を設けず設備機器は構造材に支持されるので高い安全性を確保できる。天井機能を構造部材に統合するという意味で、一種の準構造化とみなすこともできる。

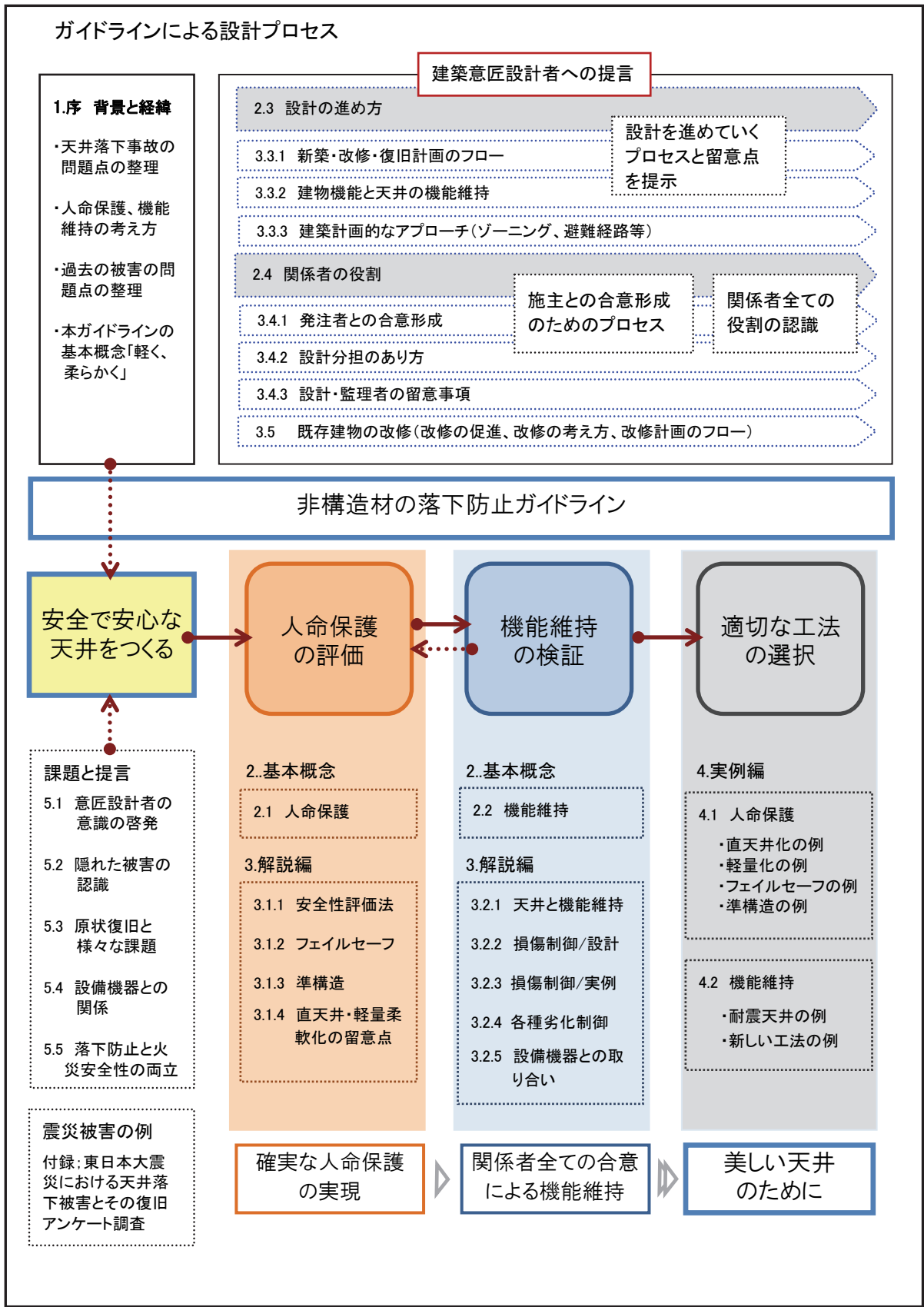



図 3.3.1.1　ガイドラインによる設計プロセス

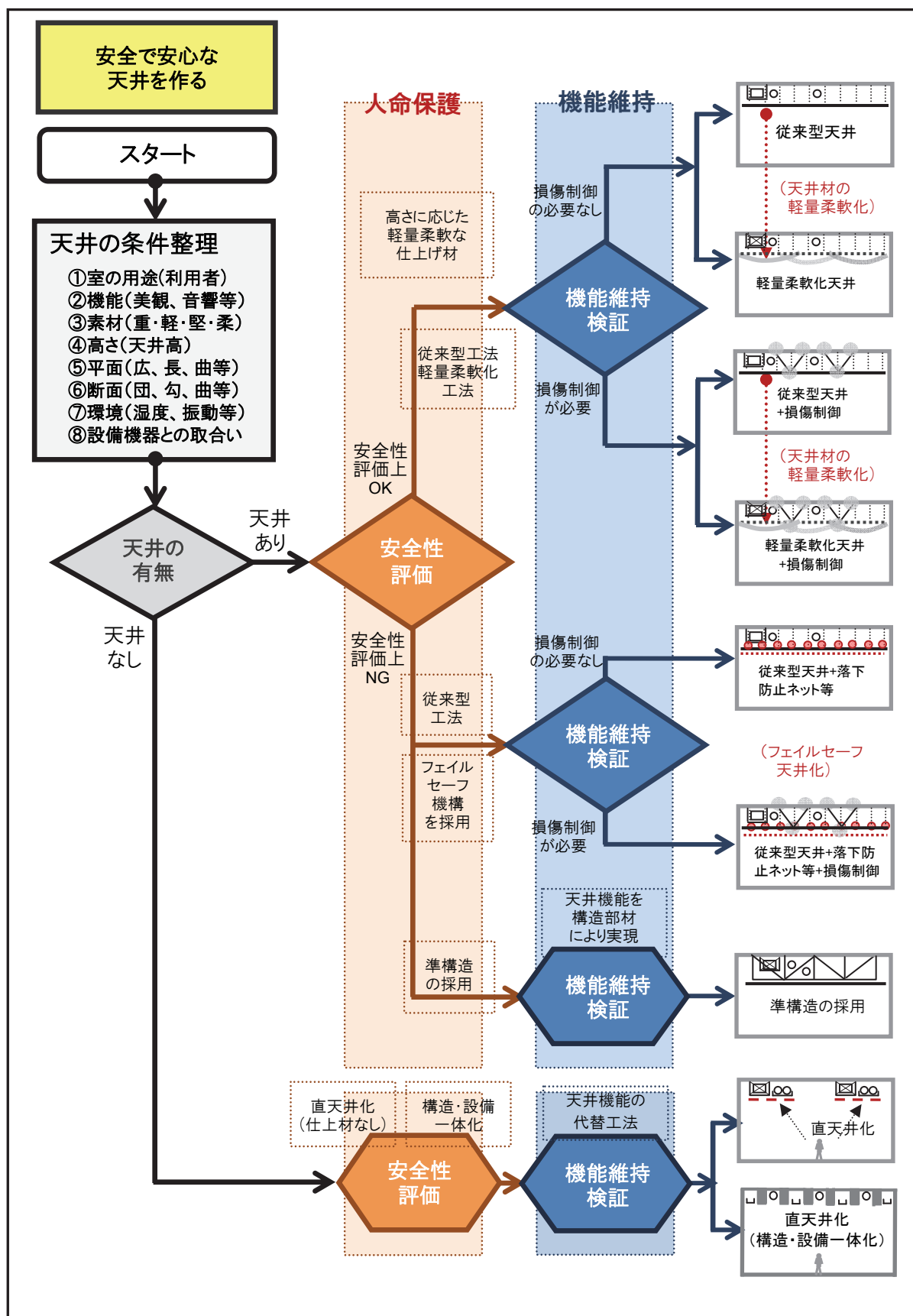
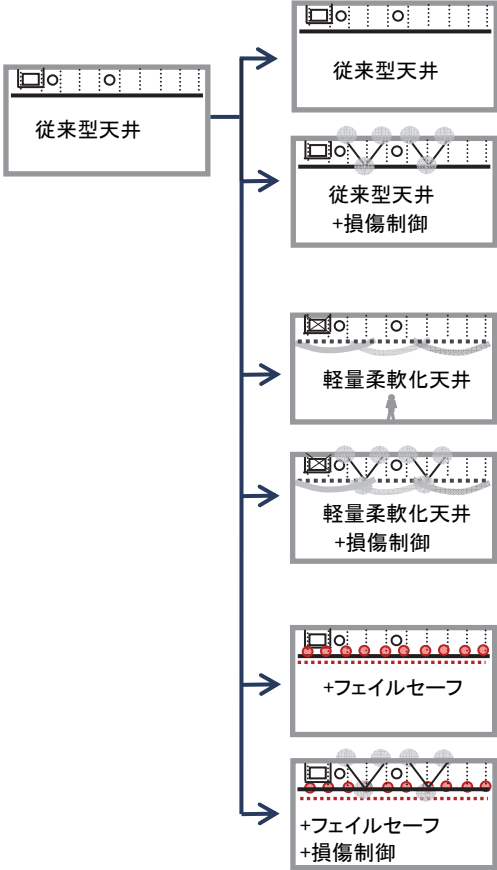
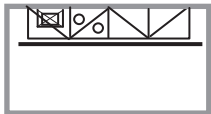
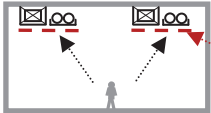
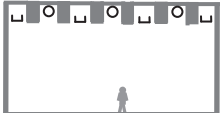



図 3.3.1.2　ガイドラインによる設計検討フロー

表 3.3.1.1　新築時工法のパターンとガイドライン

	新築時の工法パターン	ガイドラインによる考え方
従来型天井 軽量柔軟化天井 フェイルセーフ天井	従来型天井 → 従来型天井 → 従来型天井 +損傷制御 → 軽量柔軟化天井 → 軽量柔軟化天井 +損傷制御 → +フェイルセーフ → +フェイルセーフ +損傷制御	「人命保護」 ・安全性評価により、従来型天井も選択できるが、天井材は軽量、柔軟化に努める。*1 ・場合によっては、落下防止ネット、落下防止ワイヤー等を設置を判断。 「機能維持」 ・発注者と設計・施工者の合意で外力レベルと維持すべき機能を設定し、損傷制御を実現する。 ・軽量柔軟化天井においても機能維持検証により、損傷制御を施す場合もある。 ・損傷制御として耐震性能向上や振動制御を施した工法もある。 ・水分による損傷劣化制御のため天井懐内の湿度制御を行う工法もある。 ・機能維持には設備機器の機能維持も重要。 ・フェイルセーフ機構を設置した場合でも、機能維持検証により、損傷制御を施す場合も生じる 「人命保護」「機能維持」双方の検証の結果として天井工法を選択する。その結果として従来型の天井工法のまま採用の選択、あるいはフェイルセーフ+機能維持（損傷制御）の採用の選択等、適切な工法選択をおこなうことができる。 *1 軽量、柔軟化の天井材は素材により内装制限等の課題あり。
準構造化天井	準構造の採用	「人命保護」「機能維持」 ・音響機能等の要求から特に重量のある天井が必要な場合は天井下地から面材まで全てを「準構造」として設計施工し、仕上面が必要な場合は軽量柔軟に設ける。
直天井化 1 仕上げ無し	心理的な圧迫感が無い様に設備機器や配管、ダクト等の配置、見え方の工夫	「人命保護」 ・吊り天井を設けない設計 ・仕上材をはる場合は軽量柔軟なものを採用 「機能維持」 ・発注者と設計・施工者の合意で外力レベルと維持すべき機能を設定し、実現する。
直天井化 2 構造一体化天井	建築・構造・設備を一体化し、トータルで設計	「人命保護」、「機能維持」 ・建築/構造/設備を一体で設計する。 ・構造梁を PC 化し、設備機器（照明や空調設備）を組み込むなど。天井機能を構造に統合という点では一種の「準構造」化

2. 改修時の天井工法とガイドライン～「復旧から改修へ」

既存建築物に対しては「原状復旧」ではなく、落下事故を防止し、確実な人命保護の実現と機能維持を図った「改修」となるように工法を適切に選択する。

既存建築物の維持を目的として手を入れる場合、「復旧」と「改修」という概念がある。「改修」は何らかの性能や機能の向上を伴うより良い状態を目指すものであり、「復旧」は文字通り「元の状態に戻す」ことを意味している。事故発生後の「復旧」は、ほとんどが「原状復旧」かそれに近い「復旧」（ブレース等の補強を含む。「5.3　原状復旧と様々な課題」参照）を意味しており、同様な事故の再発を許すだけでなく、人命保護を原則とした落下防止の対策とはならない。天井等の落下事故を防止するためには、安易な「原状復旧」の選択ではなく、前項の新築時フローと同様に安全性評価と機能維持の検証を行い、確実な人命保護が実現される「改修」を行わなくてはならない。以下に改修時のプロセスでの本ガイドライン活用の考え方と工法の選択について述べる。

(1) 改修のプロセスと本ガイドライン

以下にまず、震災等で事故が発生したのちに想定される場合での本ガイドラインの活用について言及する。

①「落下損傷の被害なし」の状況での活用

- さまざまな損傷劣化は顕在化せずに蓄積する可能性が高く、潜在化した損傷（「3.5　既存建物の改修」、「5.2　隠れた被害の認識」参照）のリスクについて検討しておく必要がある。例えば、震度 5 強以上の地震を経験した建物は被害のあるなしに係らず落下事故発生の可能性が高まったと考え、安全性評価法に基づくチェックを行うことが推奨される。安全性評価法により危険と判断された場合の改修工法の選択などにも、本ガイドラインは有効なツールとなる。

②何らかの落下事故被害が発生した場合での活用

- 人命保護の実現を第一とし、その上での条件設定と復旧方法の選択の判断に本ガイドラインは活用できる。
- 当初は応急性を優先し、原状復旧を行ったとしてもその後にフェイルセーフ化（落下防止ネット等設置）等により確実な人命保護を実現するために活用できる。

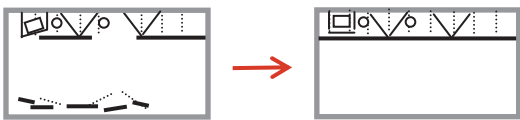
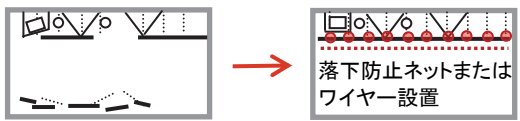
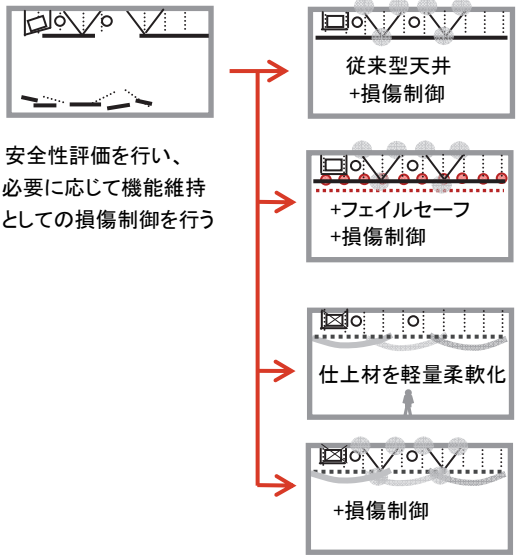
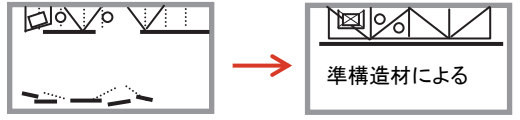
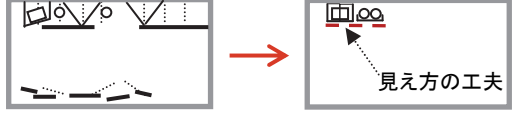
③応急でない場合での活用～復旧から改修へ

- 人命保護の評価と機能維持の検証をおこなった「改修」には、発注者側の理解と十分な合意形成が必要性である。改修方法の検討については「3.5　既存建物の改修」を参照してもらいたい。
- 官庁施設を含む公共施設の場合においては、特有の課題（「5.3　原状復旧と様々な課題」参照）もあり、別途対応が必要な場合もある。

(2) 改修時の天井工法のパターンとガイドライン

「復旧」と「改修」を明確に分けると下記の様に整理される。

【原　状　復　旧】: 文字通りの原仕様のままの復旧。（望ましくないが非常に多い）
これに加えて水平力に対する損傷防止のための何らかの措置（ブレース、金物補強、クリアランス、振れ止めといった補強工法を単体で採用、もしくは併用）が施された方法。

【原状復旧＋α改修】
【フェイルセーフ改修】: 原状仕様+αとは、応急性を優先し、やむを得ず原状復旧を先行した後にフェイルセーフ化として落下防止ネット等を設置する事例。

【従来型性能向上改修】
【軽量柔軟化改修】: 改修の際には、人命保護のため安全性評価を行い、従来型の天井も選択できるが、仕上げ材としての天井材は、軽量・柔軟化につとめる。また、必要な場合はフェイルセーフとして落下防止ネットや落下防止ワイヤーを設置する。機能維持を目的とした損傷制御の方法としては、耐震性の高い下地の採用や湿気による損傷劣化制御を行う工法等もある。

【準構造化改修】: 音響性能等の要求により質量の大きな天井面を実現するために「準構造」（構造部材として設計施工された構造部材からなる下地と天井面）を採用する方法。

【直天井化改修】: 天井を張らない選択＝天井材落下の危険性を排する方法。

本ガイドラインでは、性能、仕様として過剰ではなくその場や用途に適切な工法が選択できることを意図している。例えば、被災時に速やかな「復旧」の必要な場合や文化財等で「原状復帰」を求められる場合も想定し、「フェイルセーフ改修」の選択も用意している。応急復旧時ではない維持保全のための改修時も新築時と同様に人命保護のため安全性評価、機能維持検証を行い工法を選択する。軽量柔軟化改修は、人命保護の点から、高さに応じて、軽量で柔軟な天井材を使用する改修である（事例‒日本科学未来館、仙台メディアテーク）。従来型天井工法による改修は、地震時の機能維持要求があれば耐震性能を向上した下地を採用する等、原状復旧ではない改修を指す。準構造化改修は、劇場・ホールの音響性能上必要な重量面材を安全に実現するための「準構造」を採用する工法である。また、直天井化の場合、隠蔽されていた重量設備機器が露出することによる心理的な圧迫感に配慮する必要がある（事例‒茨城空港）。以上の考え方をまとめると次頁の表となる。

表 3.3.1.2　改修工法のパターンとガイドライン

	改修時の工法のパターン	ガイドラインによる復旧、改修の考え方
原状復旧	人命保護に基づく安全性評価を行う	・安全性評価により安全と判定された場合にのみ採用とする。 （安全性評価により、危険となった場合は下記の改修へ）
原状復旧 ＋α改修 ⇩ フェイル セーフ改修	落下防止ネットまたはワイヤー設置 ＋α＝フェイルセーフ （ネット、ワイヤー等）	「人命保護」 ・安全性評価により、落下防止ネット、落下防止ワイヤー等の設置を判断。 「機能維持」 ・発注者と設計・施工者の合意で外力レベルと維持すべき機能を設定し、これを実現する。
従来型性能向上改修 軽量柔軟化改修	安全性評価を行い、必要に応じて機能維持としての損傷制御を行う 従来型天井＋損傷制御 +フェイルセーフ +損傷制御 仕上材を軽量柔軟化 +損傷制御	「人命保護」 ・安全性評価により、従来型天井も選択できるが、天井材は軽量、柔軟化に努める。*1 ・安全性評価により落下防止ネット、落下防止ワイヤー等の設置を判断。 「機能維持」 ・発注者と設計・施工者の合意で外力レベルと維持すべき機能を設定し、これを実現する。 ・必要に応じて耐震化等の損傷制御工法を採用する考え方、水分による損傷劣化制御の考え方及び設備機器の機能維持についても新築の場合と同様 *1 軽量柔軟化の天井材は素材により内装制限等の課題あり。
準構造化改修	準構造材による	「人命保護」、「機能維持」 ・音響機能等を実現する重量面材は「準構造」として設計施工し、仕上面は必要に応じて軽量柔軟に設ける。
直天井化改修	見え方の工夫 頭上の重量物(照明器具、設備機器)が心理的な圧迫感とならない様に見え方を配慮。	「人命保護」 ・吊り天井を設けない設計を採用。 ・仕上材をはる場合は軽量柔軟なものを採用 ・設備機器，配管，ダクト等の納まりを工夫 「機能維持」 ・発注者と設計・施工者の合意で外力レベルと維持すべき機能を設定し、実現する。

3.3.2　機能維持に関する天井の設計

> 設計者は、対象となる建物・室の特性を十分理解し、当該天井に必要な機能について発注者と十分協議し、人命保護を確保した上で機能維持を実現する為に必要な措置を講じる。

1. 平時の機能と非常時・災害時の機能

人命保護を確実に実現した上で、さらなる要求として機能維持がある。平時の機能実現に加えて、非常時の「機能維持」は、建物の用途や、非常時に期待されている機能維持（建物所有者が要求している場合と、社会が要求・期待している場合がある）は、災害や外乱の種類やレベルによって個別に対応していかなければならない。

行政のサービス機関の一部のように、災害時業務が通常時の負荷よりも大きくなる室や施設もあれば、一方、その施設が有している用途とは異なる用途（機能）を災害時に期待される室や施設もある。震災等の非常時に、多くの体育館や公共ホールなどが避難者、被災者を収容したことなどが例として挙げられる。また、交通、インフラ、物流など非常時には通常時以上に業務継続を要求される施設もある。

以下、表 3.3.2.1 では、平時と非常時（主に震災を考える）に要求される機能維持の考え方によって施設の整理を試みた。「表 3.2.1.1　天井に求められる様々な性能、機能」や、「表 3.2.1.2　天井の損傷・落下と機能維持への支障」と合わせて参照されたい。

表 3.3.2.1　非常時の機能

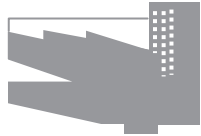
非常時の機能		該当施設
非常時業務が平時負荷を超過	・施設本来の業務が、発災等によって、通常時より増加する。公共サービス、公共性の高い施設の一部などが該当する。 ・防災拠点や司令室などの機能が強まる。 ・業務遂行に必要なファシリティは、天井落下等による損傷を受けてはならない。	・病院 ・行政機能 ・通信・報道 ・企業の HQ・BCP 部門
非常時には、通常時と異なる機能を期待される	・大空間などは、避難者を収容する機能を期待されることが多い。 ・就寝、食事その他一時的な避難生活に必要な室内環境の維持やサービスの提供も期待される。 ・通常時は会議室や研修室だが、発災後は防災拠点や司令室などになることを期待されている室もある。	・体育館 ・講堂 ・ホテル ・災害時に BCP 拠点となる研修施設
通常時・非常時に関係なく通常時（本来）の業務継続が求められる	・交通やインフラ関連施設は、非常時であっても安定したサービスの提供が求められる。 ・物流、製造関連では、非常時でもサプライチェーン維持への要求が大。	・駅 ・空港 ・バスターミナル ・物流倉庫 ・データセンター ・基幹部品の製造工場

天井の劣化や災害によって受ける損傷や落下によって、損なわれてはならない機能は何かを発注者と十分協議し、天井の設計に反映させる必要がある。

2. 用途別の整理

建物用途や特性によって、主要構造部については十分な検討をもとに適切な構法が検討されてきた。一方、天井に関してこれまで建物用途や空間の特性に応じて必ずしも最適な設計をしてきたとは言えない場合が多い。もっぱら、施工合理性、コスト、意匠の観点から在来の吊り天井工法やシステム天井などを躊躇なく選択してきたというのが実態であろう。

人命保護の観点からの落下防止対策を実現し、続いて発注者と合意された機能維持を実現する天井を設計するためには、建物用途に応じた利用者の特性、空間の特性さらには外乱の影響（振動、風、過度の湿気など）を十分に理解する必要がある。

・利用者の特性

室内の人口密度、年齢など運動能力に影響する要因、不特定多数か否か…など

・空間上の特性

天井に要求される性能、天井におよぼす（地震以外の）外力、天井高さ
吊られるもの、避難しやすいか…など

利用者の特性、空間の特性をもとに、天井の落下に関するリスクと課題、機能維持、またその天井の落下防止、損傷制御対策例などについて概観・整理した（表 3.3.2.2）。この表には一般的な特性や課題が整理されているが、実際の設計、施工、改修の場面では、個別の検討や発注者要望などをもとに、さらに具体的かつ踏み込んだ対応が必要である。

表 3.3.2.2　空間・利用者の特性と天井に要求される性能、落下防止に向けての課題

用途	利用者の特性	施設･空間の特性　天井に要求される性能など		天井の落下に関するリスクと課題	機能維持	天井の落下防止、損傷制御	
						天井での対策例	建築計画での対策例
音楽ホール 劇場 映画館	･子供連れ多い。 ･没頭や熱中。 ･人口密度高い。 （1.0 人/㎡程度）	・上演中は暗い。 ・床段差多く、非常時躓きやすい。 ・混乱・パニックが起きやすい。 ・音響性能（遮音・吸音・残響）重視で天井材は重くなる傾向であり、形状は凹凸、傾斜など複雑化。	・広大な天井裏空間。 ・音響設備等の吊り物。 ・性能上必要な高さ（気積）。 ・出演・演奏者の上に吊り物多い。	・避難に長時間を要す。 ・高所からの重い天井材落下対策。 ・遮音用防振吊り装置が上下動を加速する場合がある。	･復旧に長期間を要する場合、地域社会や事業への影響を無視できなくなる。	・準構造の採用による安全な重量天井の実現。 ・必要な音響性能の見極め。	･迅速な避難が行える計画。
講堂 会議場 食堂	･人口密度高い場合が多い。	・吸音を中心とした音響への配慮。 ・照度分布や照明演出が重要。 ・施設の顔や中核としての意匠性（折上げ天井等）。 ・飲食の場合は衛生面重視。	・室面積が広い場合、天井は高くなる傾向	・在室者が多いため、避難に長時間を要す。	・災害時の BCP 拠点を期待されることもある。	・高所に設ける天井材は軽量･柔軟なものに。もしくはフェイルセーフを考える。 ・大規模な空間では準構造の採用。	･迅速な避難が行える計画。
物販店舗 モール	･不特定多数。 ･子供連れ多い。 ･人口密度高い。	・モールでは自然採光。 ・照度分布、演出照明。 ・防煙垂壁が多い。 ・商品、什器等の物品多い。	・折上げ天井、間接照明。 ・モールや広い売り場では天井高い。	・混乱・パニックのおそれ。 ・長押やサイン、吊り物などが高所からの落下の懸念。 ・増改築や模様替えが頻繁であり、天井や下地の不連続性の懸念。	・災害時には、早期営業再開を強く望まれることが多い。	・高所に設ける天井材は軽量･柔軟なものに。もしくはフェイルセーフを考える。 ・複雑な意匠の回避。	・高い天井のある方面に避難させない計画。
博物館 美術館	･展示によっては子供が多い。 ･人口密度は物販店舗なみに大きい場合も。	・床段差がある場合も。 ・展示空間と狭所の繰り返し。 ・自然採光とその分布。	・平滑性、均質性。 ・凹凸、傾斜ある天井（空間）。	・狭所（通路）をふさぐ形での天井落下に注意。	・重要物（貴重、文化的・歴史的展示物）の保護。	・直天井の検討。 ・複雑な意匠の回避。	
ロビー ホワイエ アトリウム	･人口密度高い。 ･不特定多数。	・施設の顔としてのグレード感と意匠性。 ・ボード以外、金属製の天井なども ・屋外に面することが多く、風や湿気が侵入しやすい。	・吹抜けやトップライトがある。 ・オブジェなど巨大な吊り物も。 ・避難経路であることが多い	・避難経路として重要、天井落下等は決してあってはならない。 ・避難用の通路を塞ぐような天井等の落下に注意。 ・風・湿気の侵入による影響。	・公共施設などは、避難者の収容や、災害時拠点としての期待。	・複雑な意匠の回避。 ・懸垂物落下防止対策。	・避難動線の保護。
幼稚園 養護施設 老人施設	･避難･防御弱い。 ･災害時要援護者。 ･行動予測が難しい（幼児、加齢者）。	・遊戯室などは天井高い。 ・通路が多いことも。 ・低層が多い。	・近年、オフィスビルや商業施設への併設も見られる。	・混乱・パニックが起きやすい。 ・重量物の落下は、弱者に大きなダメージになる。	・低層の場合、避難者の収容、災害時拠点への期待。	・幼児への攻撃性に留意した軽量な天井材の採用。	・幼児や加齢者の避難計画と安全な滞留場所の確保。
体育館 アリーナ	･集会･イベント使用では、幅広い利用者層。 ･集会時は人口密度が大。	・観覧席がある場合も。 ・自然採光が多い。 ・スポーツ種目が要請する高さ。 ・円弧状、切妻状天井（空間）。	・開放感、気持ちよさ。	・内部空間が湿気や風、紫外線などの影響を受けやすい。	・避難拠点。 ・防災上の拠点。	・直天井の検討。 ・準構造の検討。 ・落下防止ネットの検討（既存）	・十分な避難用出口。
プール 公衆浴場	･無防備な身体。 ･利用者の多くは裸足。 ･子供多いことも。 ･避難は難しい。	・プール、プールサイド、観覧席の構成になる。 ･天井材への水分蓄積や塩素による下地鉄骨の腐食などのおそれ。	・床が滑りやすい。水勾配も。 ・眼鏡なし、かつ湯気で視界が悪い	・プールの中では逃げ遅れる。 ・裸足なので、落下した天井材や下地鉄骨等で足に大怪我の恐れ。 ・非地震時の天井落下への懸念。	･公共施設としての機能維持。	･下地鉄骨等の十分な防錆処理。 ・天井裏換気。 ・水分を保持しない天井材採用 ・天井裏の点検を容易に。	・プールサイドは天井を低くするなど。
病院	･思うように動けない人が多い。 ･災害時要援護者。 ･医療スタッフ。	・受付ロビー等の大空間と病室や検査室、処置室などの小さな諸室からなる。 ・廊下が多い。 ・診療部門は複雑な動線。		・治療の現場や医療機器に対する天井落下等がある場合、患者の生命維持に対する脅威となる。 ・廊下を塞ぐような天井落下に注意。	・災害時には、平常時を上回る医療提供能力を期待されることが多い ･ロビー等では避難者の収容、災害時拠点への期待。	・手術室、集中治療室等、生命維持に関わる室では天井が一部でも落下しないこと。 ・ロビー等では準構造の検討。	・十分な防災計画。
駅舎 空港 交通施設	･不特定多数。 ･滞留と流動。 ･ほぼ 24 時間人がいる場合が多い。	・鉄道による常時の振動。 ・音響性能（放送等の聴き取り）。 ・表示やサインが多く吊られる。	・半屋外部分では、風による天井への繰り返しの外力も。 ・階段やエスカレータなど移動空間多い。	・高所からの天井材落下懸念。 ・大人数によるパニック。 ・階段やエスカレータの斜め天井の落下防止対策。 ・非地震時の天井落下への懸念。	・公共交通の機能維持。	・風圧対策（列車通過時も）。 ・懸垂物落下防止対策。 ・直天井化の検討。	･土木構築物と建築の整合。
宿泊施設	･特定多数 ･ロビー等は不特定多数 ･外国人 ･24 時間人がいる ･宴会等では多人数	・ロビーや宴会場など大空間 ・増築などが繰り返される事例が多い。 ・高い天井、低い天井が連続	･宿泊部門、料飲部門、宴会部門、ロビー、店舗など様々な用途や空間の複合。	・高所からの天井材落下懸念。 ・大人数によるパニック。 ・宴会場などでは、シャンデリアなど吊り物が大きく揺れることによる恐怖感。	・災害時には、避難拠点や臨時の宿泊所など、平時と異なるサービス提供を期待されることも。	・宴会場、ロビー等では、懸垂物落下防止対策。 ・軽量柔軟な天井で魅力的な意匠の実現。機能維持も。	・宴会場等には十分なホワイエやロビー。
行政機能	･不特定多数。 ･勤務者も多い。 ･24 時間稼働（消防、警察など）	・築年数の古い建物が多い。 ・執務空間、接客空間（受付）、会議場、倉庫など様々な用途や空間の複合。	・増築などが繰り返される事例が多い。	・築年数の古い建物では、かなり古い天井の工法であることが懸念。 ・大規模な施設では、廊下を塞ぐような天井落下が懸念される。	・災害時には、平常時を上回るサービス提供能力を期待される。	・災害時拠点室等では高レベルの機能維持が[必要。 ・会議場等大空間では損傷制御とフェイルセーフの併用等。	・十分な防災計画。
ﾃﾞｰﾀｾﾝﾀｰ	･特定少数。 ･人の立ち入りは厳しく制限。 ･非居室多い。	・多量のコンピュータからの発熱が大きい。そのため高度な空調が行われる。		・小規模の天井落下でも、コンピュータや機器への損傷に繋がれば、機能維持に重大な影響。 ・天井フトコロ内が損傷すれば、同様に、機能維持に重大な影響。	・行政や企業のサーバや重要データを保持し、彼らの BCP の一翼を担う。 ・地震時・大規模停電時の機能維持を強く求められる。	・直天井化、損傷制御による機能維持とフェイルセーフの併用あるいは準構造が望ましい。	
工場 物流施設	･特定少数。 ･非居室多い。	・巨大な空間が多い。 ・生産装置等で視界が悪い。 ・常時の振動 ・防塵、清潔	・採光 ・高度な空調	・大空間のため、天井も巨大に。 ・生産装置などで視界が悪いことが多く、天井の落下等が見えにくい。	・企業の事業継続。 ・社会的影響が大。 ・サプライチェーンへの影響最小化。	・準構造の検討。 ・金属屋根から天井を直接吊らないこと。	

3.3.3　建築計画的アプローチ

天井高、形状、設備機器の設置位置等は、落下事故防止上重要な事項であり、建築計画や空間構成、デザイン、避難計画、メンテナンス計画の面からも十分に検討する。

天井材・下地・設備機器等との取り合いなど、天井近傍で考えるだけでなく、建築計画・空間構成・デザインの面からも考えるべき点は多い。まず、多人数の集結する場所や避難時に必ず通る場所において天井落下事故のリスクをなるべく小さくすることについて建築計画・避難計画面からも考える必要がある。これらは既存の施設にも応用できる発想である。以下に、天井のデザインについて、天井落下のリスクをもとに課題や対策を述べる。安全性の確保について、発想を広げることも重要である。

1. 建築計画、避難計画

(1) 主要な避難経路

避難階においては、上階より階段から降りてきた人がなるべく避難階の中を通らず、直接または最短で地上まで避難できることが望ましい。

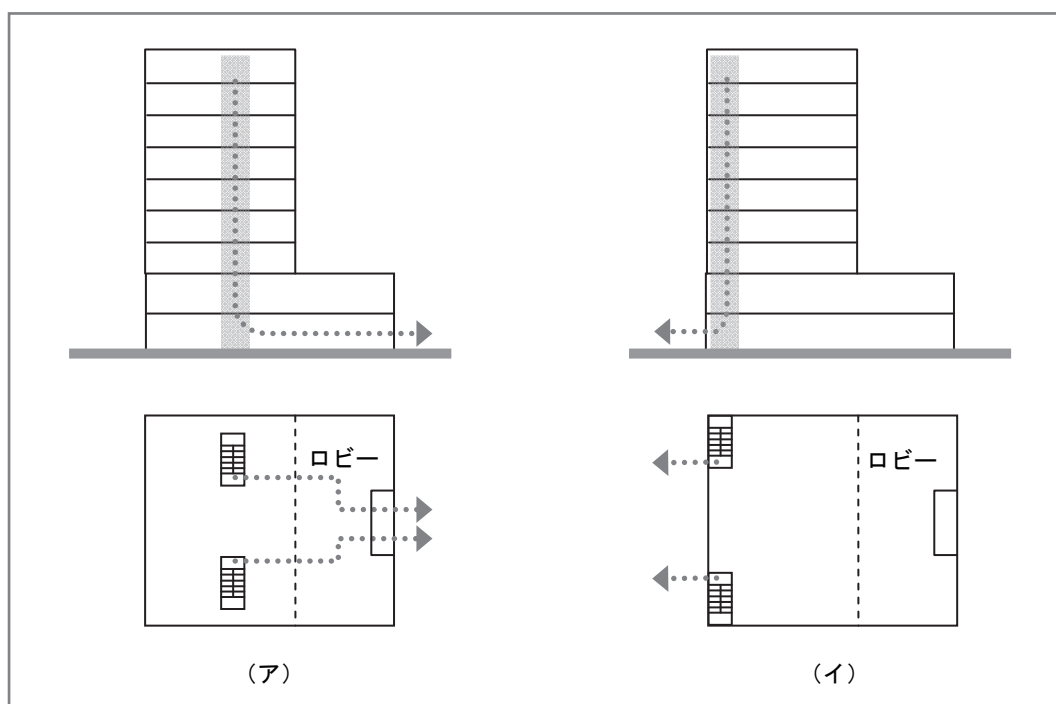



図 3.3.3.1　避難階における避難経路の考え方

図 3.3.3.1 の（ア）のケースでは避難者の大部分が 1 階を通らないと避難できない。1 階は天井の高いロビーやホール等もあるため、震災時等は天井落下事故に遭遇する可能性も高い。外部からの救助活動にも支障が出る。（イ）のように、階段から屋外に直接通じているか、最短で屋外に避難できる計画が望ましい。

火災時の避難についても同じである。1 階で火災が発生した場合を想像すれば容易に理解できる。天井の高い部分を主要な避難経路としない努力をしたい。

劇場や映画館、ショッピングセンターなどでは天井の高いホワイエやロビーを通って避難する人数をなるべく減らすような避難計画としたい。

(2) 観覧席等を有するアリーナ

観覧席等を有するアリーナの計画では、アリーナ部分の天井は高く、観覧席部分を低く押さえることで天井落下による危害のリスクを小さくできる。天井の低い観覧席からアリーナに向かって空間が大きく広がっていく空間演出は無理がない。観覧席部分の気積を抑えることで空調ボリュームが小さくなり省エネともなる。

なお、人命保護が確保されている天井でも、吊り長さが長くなると耐震工法による機能維持では不利になることが多い点に注意を要する。音響性能上、質量の大きな天井が必要な場合は準構造として計画する。

図 3.3.3.2 観覧席等を有するアリーナ

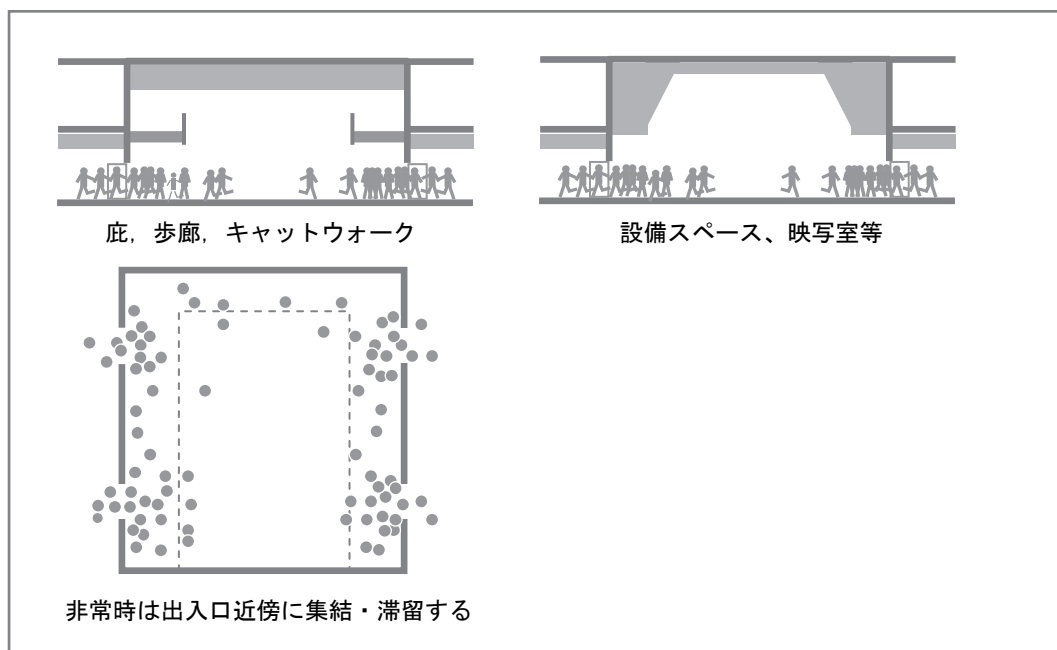



図 3.3.3.3 出口近傍への滞留

(3) 多人数が滞留する場所の天井高

大空間の避難出口では、非常時に人が集結することで滞留が生じやすい。避難出口がある大空間の周縁部の天井高を低く押さえることにより安全性が高まる(図 3.3.3.3)。外壁タイル等の落下被害防止のために建物外周部を植栽帯としたり、出入り口に庇やポーチ・回廊などを設けることと考え方は似ている。

(4) ホワイエ、ロビー空間

大空間の天井落下防止と同じく、劇場や映画館のホワイエ・ロビーの天井落下防止性能も重要である。前節 (1) でも述べた通り、劇場や映画館からの避難者の多くはなるべく最短経路で屋外や階段、避難用廊下に避難できることが望ましい。

一方、人は入って来た方向に避難する傾向があるため、ホワイエ・ロビーへの避難者も一定数考慮に入れる必要がある。ホワイエ・ロビーの広さについては、想定される避難人数を収容出来る広さを有すべきである。想定避難人数×0.3 ㎡程度以上の広さが望ましい。

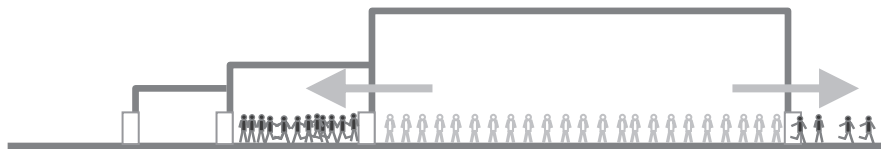



図 3.3.3.4　ホワイエ，ロビー空間

(5) 排煙設備との関係

排煙設備の中でも、機械排煙設備は天井懐内のダクトが必要である。排煙ダクトは排煙時の静圧に対抗するため頑丈な作りとなり重いものになる。また排煙口を防煙区画内の各部分から30メートル以内に設ける規定があり、天井における存在感は大きい。過去の震災では排煙ダクトや排煙口の脱落、またそれによって天井が共連れで落下するなどの被害が多く報告されている。

図 3.3.3.5　天井チャンバー方式

仕様規定による設計

500 ㎡以内ごとに防煙区画と排煙口を設ける必要がある。

階避難安全性能による設計
（排煙設備あり）

防煙区画は 1500 ㎡まで広げられる可能性がある。排煙ダクト長さや径も短くあるいは小さくて済む可能性がある。

階避難安全性能による設計
（排煙設備を設けない）

排煙設備を設けない設計も可能。排煙口やダクトが不要になる。

階避難安全性能（建築基準法施行令 129 条の 2）を確かめることにより、排煙設備の設置に関する規定および排煙設備の構造に関する規定については適用除外となる。
火災に際して、避難する時間よりも煙が避難に支障のある高さまで降下する時間が長いことを確かめることで、排煙設備を設けない計画が考えられる。
煙降下の制御のために排煙設備を設ける場合でも、排煙設備の構造に関する規定が適用除外になり、設計の自由度が向上する。
例えば防煙垂壁は通常の設計（仕様規定に従う設計）では 500 ㎡以内ごとに必要であるが、階避難安全性能によれば 1,500 ㎡以内ごとで済む。

室面積が 1,500 ㎡以下であれば防煙垂壁は不要であることになり、垂壁落下もしくはそれによって引き起こされる天井損傷等のリスクは大幅に低下する。
必要な排煙量についても小さくすることが可能であり、防煙区画の話とあいまって、排煙ダクトのサイズや長さを大幅に低減できる。

階避難安全性能は、天井高さと大きく関係がある。一般に天井が高い場合に蓄煙効果が高まり、煙が降下する時間が長くなりやすい。低すぎる天井では成立が難しい場合がある。

図 3.3.3.6　階避難安全性能を確かめる方法

排煙ダクトが梁の下をくぐるところでは、部分的にダクトを扁平にしたりするなどイレギュラーな個所も発生しやすいので注意したい。天井懐内のダクトや設備機器の整然とした配置は天井落下防止対策の基本である（3.2.5 項、5.4 節参照）。

(6) 半屋外・半屋内空間

駅舎などで、大空間が一日の大半を屋外に向けて開放されている場合、風や湿気の侵入は天井に劣化損傷を与え続けることが多い。特に風は天井材や下地を常時揺らすことで天井落下の危険性が高まる可能性もある。駅舎などでは機能上、多くの懸垂物も存在するので、これらの落下安全性についても十分配慮する必要がある。

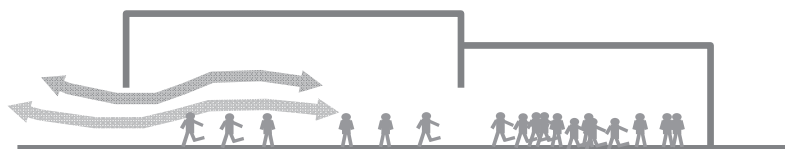



図 3.3.3.7　半屋外空間、半屋内空間

(7) 強固な垂壁、額縁などの利用

天井材は軽量柔軟なものが望ましいが、人命保護を確保した上で、大空間での地震時の機能維持のための損傷制御を考えた場合、準構造の垂壁のようなもので天井を互いに区切り、連続した天井面積を小さくし、天井にかかる水平力を分散化することで、下地の耐震補強材の複雑な納まりを軽減することも可能である。防煙垂壁を準構造とし、これと兼用するなど防災面との整合を図ることも考えられるが、垂れ壁の損傷落下は確実に防止しなくてはならず、十分な技術的蓄積が必要な工法といえよう。

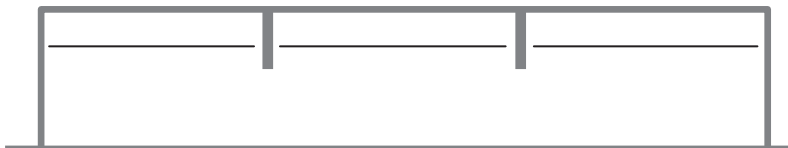



図 3.3.3.8　縁を切る

(8) 点検やメンテナンスを容易にする計画

大空間を有する大規模施設や複合施設は、大規模ゆえに雨漏りや設備配管からの漏水などで天井等の非構造材の劣化が発生する可能性が格段に高い。人命保護が確保されているとしても、これらの劣化は避けることが望ましい。天井や天井裏の点検・メンテナンスの重要性を再認識し、点検等が日常的に容易に行えるよう配慮した計画としたい(図 3.3.3.9)。

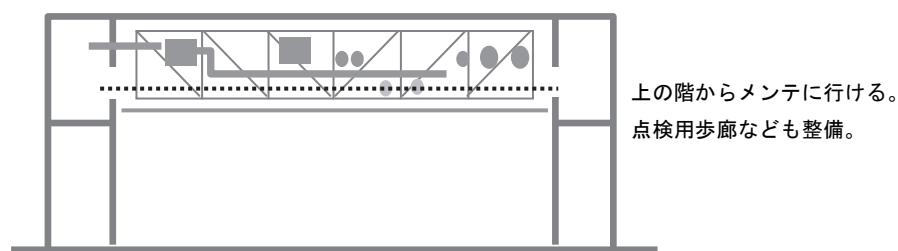



図 3.3.3.9　点検やメンテが容易に行える

(9) 最上階の無柱大空間

会議場、食堂、劇場、映画館、工場などを無柱の大空間として最上階に計画することは多い。この場合、階高と天井高も高くなり、屋根は構造スラブではなく軽量な折版屋根となることも多くなる。そのため地震時に応答加速度が高く、地震時の天井落下被害が多くなる傾向があると考えられる(本ガイドライン付録参照) (図 3.3.3.10)。

上層部に多人数を擁する居室などを設ける場合、天井を軽量・柔軟な材料で仕上げる、直天井を採用する、フェイルセーフを設ける、準構造とするなど人命保護を第一に実現する。加えてこうした大空間を最上部に設置する必要があるのか？地上近くに設置するべきではないか、といった建築計画の冷静な判断も必要である。大空間で人数の多い階を上層部に設けた場合、火災その他の要因による避難に関しても支障がでる可能性もある。

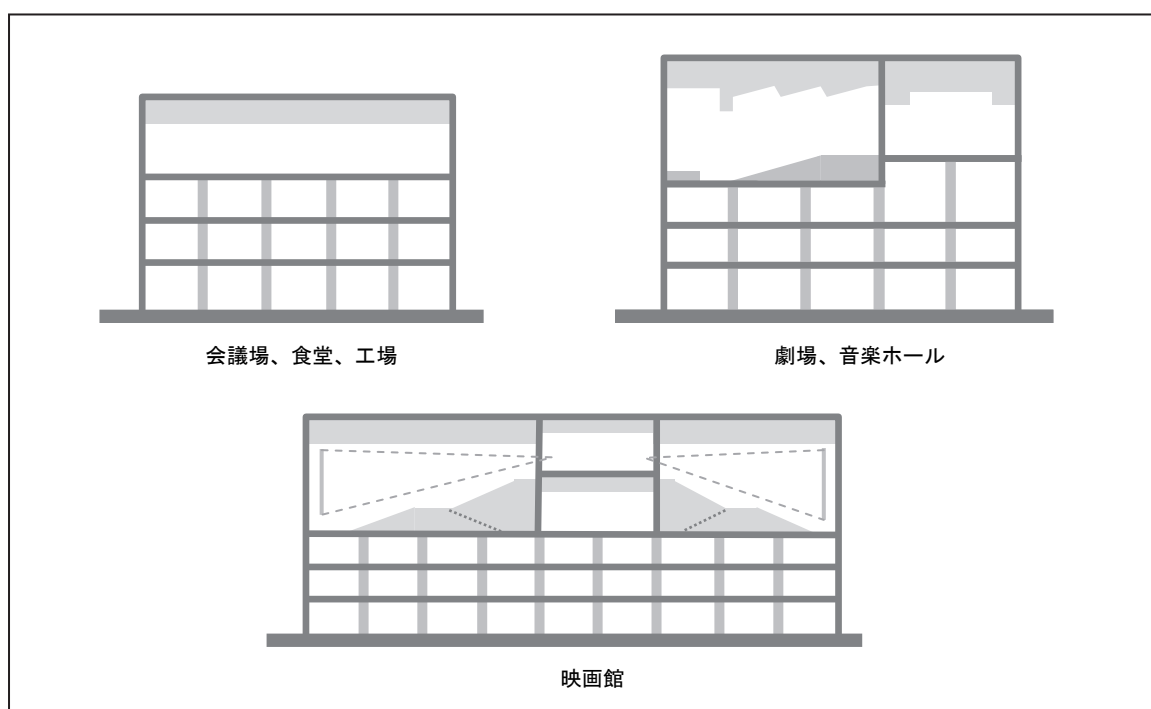
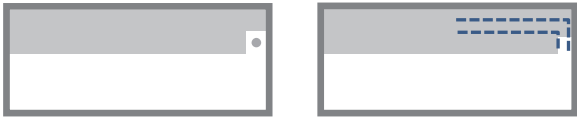
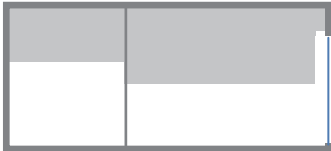
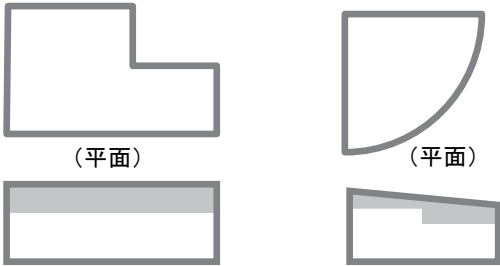
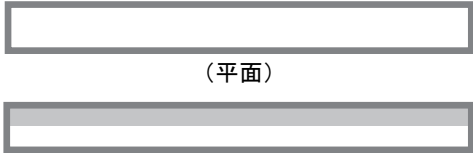



図 3.3.3.10　最上階の大空間

2. 天井のデザイン面からの検討

天井は重要なデザイン要素である。折り上げたり、斜めにしたり、曲面状にしたりすることで空間内に場や通路空間などを表現したり、高揚感やドラマ性などを生み出したり、音響性能の確保のため音の反射や残響を考えて複雑な形状にすることもある。

一方、天井の凹凸・段差などイレギュラーな部分では、例えば、地震時に局所的に大きな力が作用して損傷が生じやすいことは繰り返し言われてきた（※1）。本ガイドラインでは、仮にこのような損傷が発生しても、人命保護を確実に確保するための方法について述べている。

しかし、こうした天井段差等を試みる場合は、その高さや天井材（の特に重量）、工法に対し、まず、大いに心を砕いて検討すべきである。人命保護が確保されていても、損傷が発生することで機能維持上の問題を誘発しやすくなる。デザイン、面材の種類やその設置高さによっては準構造で実現しなくてはならない場合もある。一方、どうしてもそのデザインが必要なのか、もう少し意匠的に無理のないデザインにできないのかといった冷静な検討も必要である。

ここでは、設計者が比較的多く試みる天井の意匠に関して、その理由ならびに対応のヒントなどについて述べる（表 3.3.3.1）。

※1　2003 年十勝沖地震を契機として出された国土交通省の技術的助言「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について」、また東日本大震災の天井落下事故でも数多く報告されている。

表 3.3.3.1　天井のデザインから考える

天井の形状	課題や対策
主通路の上の折り上げ天井や間接照明	・段差などイレギュラーな部分が、人通りの多いところの上にあることが地震時損傷のリスクとなりやすい。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・過剰な意匠への慎重さ
壁と取り合う部分で間接照明や制気口（吹出し口、リタン）	・天井と壁が接する部分で、そこが地震時の弱点になるおそれがある。 ・軽量柔軟な天井材の採用
天井端部を開口部の手前で大きく折り上げ 外から見て開口部を大きく見せるため、開口部のガラス面などに添って天井端部を折り上げる例も多い。	・大きな段差が、地震時には弱点になるおそれがある。開口部を突き破って屋外に落下・飛散するリスクもある。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・規模が大きい場合は準構造方式を採用 ・過剰な意匠への慎重さが必要。
斜め天井、階段状の天井	・吊り長さが不揃いになるため、地震時には弱点になるおそれがある。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・規模が大きい場合は準構造方式を採用 ・過剰な意匠への慎重さが必要。
壁際を低くする（中央を高くする） 居室の周辺部を少し低くするデザインである。段差部分に間接照明を仕込むこともある。設備の納まりによる場合も。	・避難時に人が集まる部分の上に段差があるが、それが地震時の天井損傷・落下の引き金にならないようにしたい。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・段差部が大きな場合、準構造方式を検討。
平面形状が凹凸、円弧状など整形でない場合 （平面）　（平面）	・平面形状が凹凸である場合、地震時、壁面の突出部（凸部）に天井が衝突することによる損傷が起きやすい。 ・円弧状などの平面では、下地等によっては、不規則な揺れが生じ、損傷のリスクが大きくなる。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・整形でない平面形状では、天井の断面方向のデザインも複雑になる傾向があるため注意したい。
平面形状が長い、廊下状の場合 （平面）	・地震時、天井の長手方向に大きな慣性力や水平面内の回転を伴い、接続する壁に衝突し、損傷が起きやすい。 ・軽量柔軟な天井材の採用 ・天井フトコロに配管、配線、ダクトが高密度になっていることが多い。 ・廊下の多くは避難経路となる。空間の機能維持に対して特段の注意を払いたい。

3.4　関係者の役割

建築物の天井等の非構造材に携わるすべての関係者は、それぞれの立場で、人命保護と機能維持において果たすべき役割と責任を認識し、脱落・落下等による人命に危険を及ぼすことの無い、安全な建物を社会資本として提供する。

天井等の非構造材に携わるすべての「関係者」は、平時はもちろん地震などの災害時、材料劣化やさまざまな外乱に対しても、建物利用者の人命を守る役割と責任を持つ。関係者は、それぞれが役割を果たすことで社会資本を整備・維持し、結果として社会の信頼を得る。

ここでいう「関係者」とは、発注者、設計者、施工者、専門工事業者、材料製作業者、完成後の建物所有者・運用者、保守メンテナンス業者等の建設事業側はもとより、立法、官公庁等の行政、確認検査機関、学術研究者等の仕組みを司る側をも包括して示す。更に意匠、構造、設備その他関係する全ての業種においてその専門性分野には境界を設けること無く、すべてを含むものと解釈する。

従来、企画の開始から完成・運用までの一連の建物建設システムにおいて、「関係者」間での連携や責任分担が明確であったとは言い難い。度重なるなる脱落被害の経験をもってしても非構造材、特に天井等の脱落防止に関しては、残念ながら専門性を有する立場として、守備範囲を超えて一致団結して立ち向かってきたとは言えない。

非構造材、特に天井（頭上に存在する全てを含む広義の天井）に関係するすべての「関係者」は、過去の被害から目を逸らさずに、役割分担とその責任を意識し、脱落・落下等により人命に危険を及ぼすことの無い、安全で安心な建物を社会資本として提供しなければならない。

3.4.1　発注者との合意形成

発注者との合意形成とは、適切な天井の設計案の提示を行い、これを実現し、維持管理方法を明示した上で、引き渡すまでの各段階において、設計者及び各段階の主任者が、発注者に対し、平時、非常時の天井落下に関するリスクを確実に伝達し、決められた経済性の中で、確実な人命保護の実現方法と必要な機能維持について、十分な意思の疎通をもって、双方で確認し理解を得、健全な合意を形成することである。

発注者との合意形成には、天井落下のリスクの確実な伝達と理解、構造躯体の損傷を伴わずとも天井等の落下は起こることや非地震時の落下について伝えることを含む。さらに、人命保護を大前提としながら必要な機能維持について確認し、天井落下防止性能と経済性とのバランスをとり、適切な天井の設計案の提示を行うことまでを含めた概念である。

1. 発注者との合意形成

発注者との合意形成という言葉は、発注者と設計者が話し合って、天井や内装全般に関わる物事を決めていくという意味であるが、このガイドラインでは以下としたい。

非構造材落下事故からの人命保護を念頭に置いて、設計者から発注者に

・天井など頭上にあるものが落下した場合の危険性・リスク
・地震時以外でも、天井落下は起こりうること
・採用する天井材については安全性評価法によって評価し安全なものを採用する、もしくは準構造方式を採用するかフェイルセーフの考え方を導入すること

について確実に伝え、理解してもらうことが第一である。

天井は一様な面として構成されていることが多く天空に近い認識となり、「天井が落ちてくるかもしれない」と考えるのはまさに杞憂に近かった。このような認識が天井の落下防止について発注者と設計者、主任者が議論し考えていく上での障害となっていた。天井は落下の危険性があり、天井材の材質と設置高さの関係で人命への重大な脅威となりうること、天井材がそれほど重くなくても一定以上の高さから落下して人の頭部を直撃した場合、人命にかかわることなどを最新の知見をもとに伝える必要がある（「3.1.1　安全性評価法」参照）。地震時以外の天井の落下事例や、下地材等に地震等によるダメージが蓄積され、一定期間を経て落下する可能性があることなども伝える。

続いて、機能維持の観点から

・天井に関する様々な性能と天井落下防止性能、経済性とのバランス
・必要な機能維持の確認
・以上をもとにした、適切な天井の設計案の提示

というプロセスがある。以上が発注者との合意形成である。

発注者との合意形成を進めるための具体的な方法を以下に述べる。

2.　地震(応答)の大きさと天井落下防止性能に関する合意形成

主要構造部の耐震グレードについて、発注者との合意形成には図 3. 4. 1. 1 に示すようなメニューがしばしば使われる。構造体の被害は「無被害」→「軽微な損傷」→「補修を要する損傷」→「著しい損傷だが倒壊・崩落しない」→「倒壊」…のように表現される。人命保護はこの中で倒壊・崩落に関わる段階で議論されることが多い。建物が倒壊しなければ人命は保護され、倒壊時に初めて脅威となるという考え方が根底にある。そのため損傷が殆ど無い段階において、非構造部材の落下が人命に脅威となる危険性については見過ごされやすい。

意匠設計者と構造設計者の役割分担が悪しき縦割りとなって、構造体に関しては発注者と目標性能やグレードについて合意したが、非構造部材は合意形成どころか議論されてこなかったことがほとんどの場合であったと考えられる。

近年、構造体が健全でも天井が落下、さらには大規模な崩落まで起きることがあること、それが人命に脅威になることの認識が強まってきた。天井等非構造部材に関して同様のものを試行すると図 3. 4. 1. 2 のようなイメージになると考えられる。

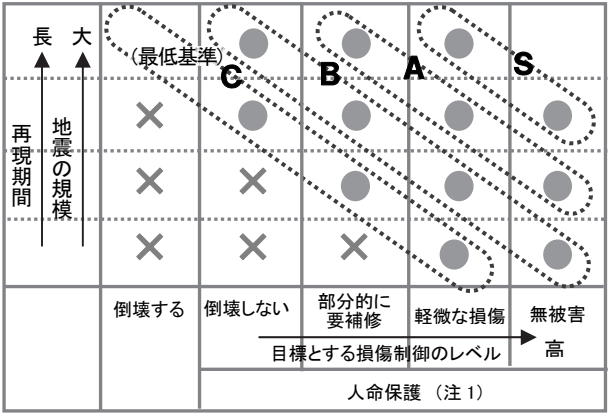



図 3.4.1.1　構造耐震グレードの考え方の例

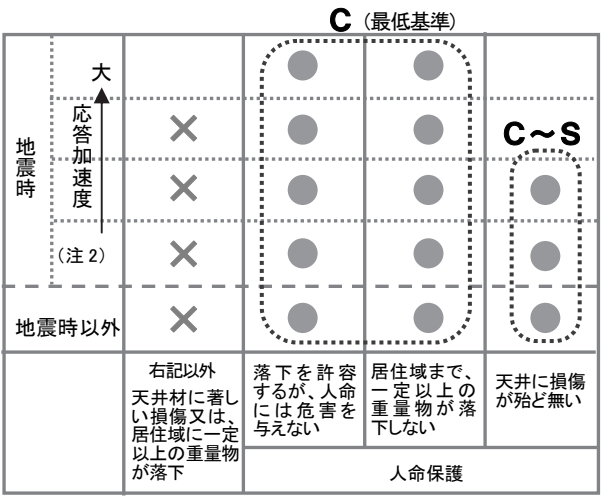



図 3.4.1.2　地震時の天井落下防止性能の考え方の例

図 3.4.1.1、図 3.4.1.2 ともに人命保護は必ず守るべき最低基準である。本来この二つの図は統合すべきものであるが、統合することで非構造部材の落下の可能性やリスクが見えにくくなるおそれもある。

注1　人命保護は「倒壊しないこと」のところに書かれることが多い。「倒壊しない」以下の損傷レベルであれば直接生命に脅威とならない…という認識であるが、「倒壊しない」以下の損傷レベルで非構造材の落下防止を行うことで初めて人命保護は達成されることを伝える必要がある。

注2　天井部分の応答加速度とした。免震・制震装置の有無、階や構造形式などが応答加速度に大きく影響するため。

3．天井に関する様々な性能と落下防止性能、経済性とのバランス

発注者の様々な夢や要望（性能）と投入できる資源（コスト）の中で天井の安全性を議論しなくてはならない。音響、採光、意匠などの要求性能はすべて天井など頭上の空間と関連が強い。大空間の場合は特にその傾向が強い。事業面から要求される性能（高さ、音響、照度分布等）を優先させると、天井落下防止等安全に関する性能の発揮が難しくなる場合がある。また、実際に落下しなくても天井等の揺れや損傷、天井付帯物の揺れ、揺れに伴う音なども恐怖の対象となる。

・天井等に要求される性能（機能）
・天井の落下防止性能（安全性）
・コスト（経済性）

の鼎立（バランス）については早期に議論を開始する必要がある（図 3.4.1.3）。

例えば音楽ホールでは反射や残響が重要テーマである。この問題を突き詰めると天井はより複雑な形状となり、単位面積当たりの重量は増加する。これと天井落下防止性能を両立させるために、高い費用を覚悟しなければならない。コストを一定レベルに抑えるのであれば音響に関する性能を幾分我慢しなければならない。「このホールに本当にこれだけの性能が必要か？」という問いかけが必要である。

商業施設などで、折上げ天井や間接照明の多用など意匠的に過剰なものにするとコストが足かせとなり、それに応じた天井落下対策は難しくなってくることが多い。落下防止性能とのバランスに十分配慮した意匠としたい。

天井等に要求される性能を上げていくと、コストはある時点で急に上昇する（図 3.4.1.4）。下地材の増強、準構造の採用などがあるからである。要求性能の極大化を防ぎ、適切な性能レベルと安全性がバランスされた建築企画を指向したい。安全性を犠牲に成り立つ“性能”があってはならない。

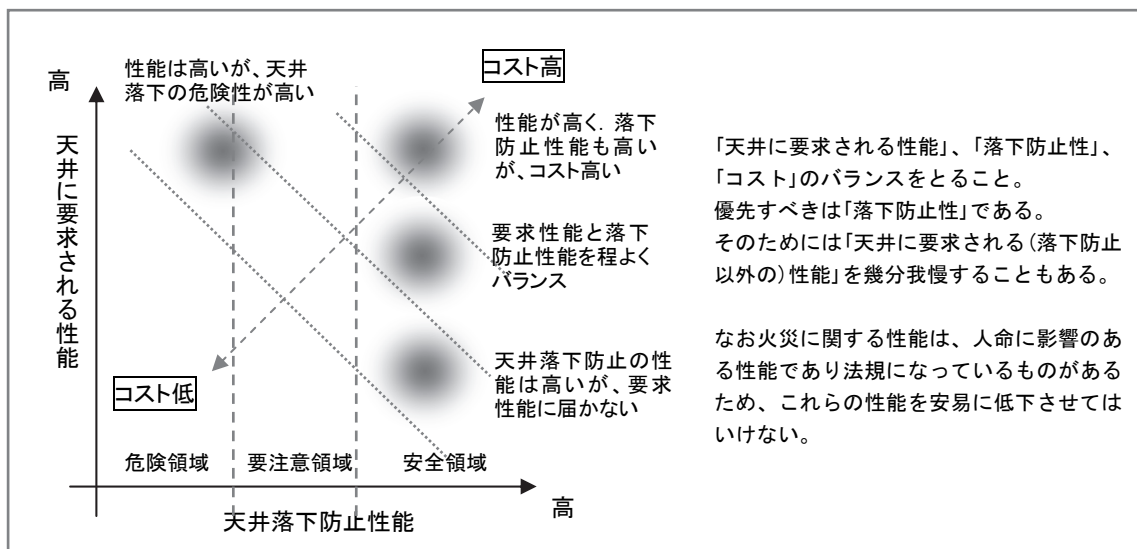



図 3.4.1.3　天井に関する性能のバランス

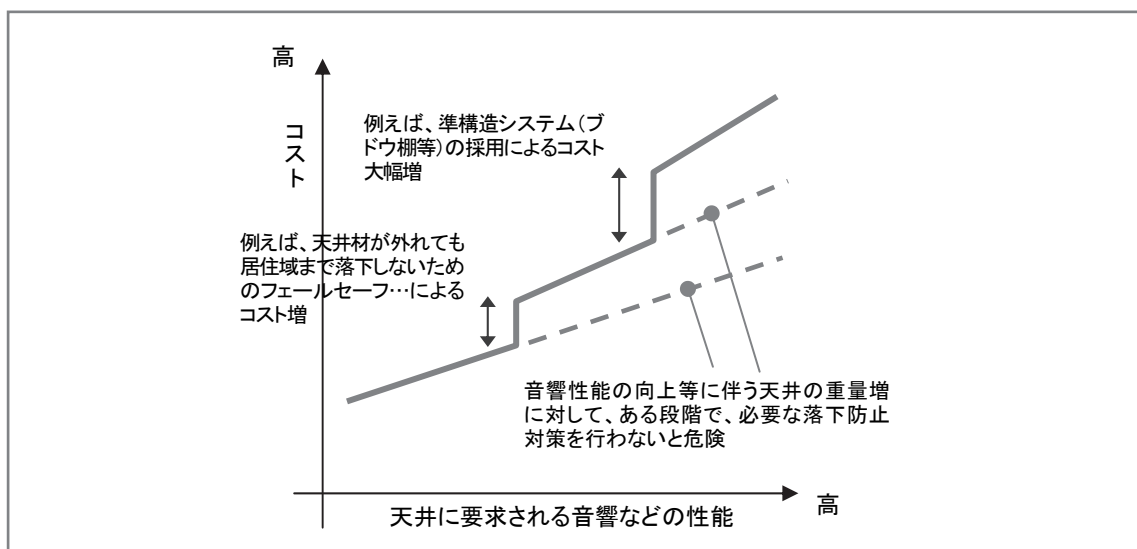



図 3.4.1.4　性能とコスト（天井の落下防止対策がなされていることを前提）

5. ブリーフ（天井に関する建築企画書）のすすめ

(1) ブリーフ（建築企画書）とは（注 3）

発注者と合意形成する上でブリーフ（建築企画書）の作成が有効である。本来は発注者サイドで作成するが、ここでは発注者と設計者が合意するために設計者が作成してもよいと解釈する。

設計行為は、発注者要望・外的条件・法的条件・コストをインプットとし、設計図書をアウトプットとする行為であるが、コストの不適合や与条件の未達成、さらにそれらに伴う手戻りなどの不具合を最小化するためにブリーフは有効である。

まず、発注者与条件・外的条件・法的条件・コストをインプットとし、発注者と設計者

で作り上げたブリーフ（建築企画書）をアウトプットとする。次にブリーフをインプットとし、設計図書をアウトプットとする（図 3. 4. 1. 5)。ひと手間余計にかかるように見えるが、設計条件を深く共有することでコスト適合も含め間違いの少ない設計になり、設計工程も実は短縮できる…急がば回れである。こうした一連の行為をブリーフィングという。実務的には略設計や目標コストに対する試算などが含まれることがある。建物全体に関するブリーフと特定の部位やテーマに関して行う分科会的なブリーフがある。外装、主体構造、外構・緑化計画そして天井などのブリーフが考えられる。

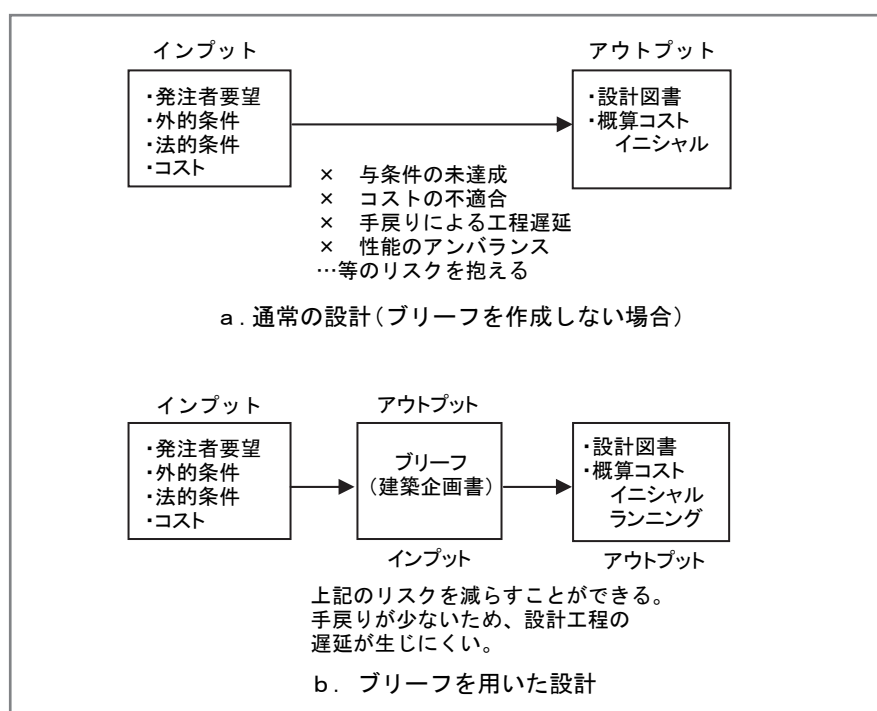



図 3.4.1.5　ブリーフ（建築企画書）の位置づけ

注 3　ISO 9699　1994 に定義されている。ブリーフ（建築企画書）は、発注者や使用者の関連する必要事項および目的、プロジェクトの背景および適切な設計上の要求や制約条件、イニシャルコスト、ライフサイクルコスト規定する業務文書である。こうして発注者および関係者の要求、目的、制約条件を明らかにし、分析するプロセスをブリーフィングという。

日本建築学会では、建築設計ブリーフ特別調査委員会が 2007 年 5 月 24 日に「より良い建築をつくるための提言～建築企画書（ブリーフ）の活用に向けて～」をまとめている。

(2) 天井に関するブリーフ

天井に関するブリーフの考え方を例示する。

インプットとアウトプットの項目を挙げた（図 3. 4. 1. 6)。

まず人命保護を中心に天井落下防止の重要性についてプロとして発注者に伝える必要がある。

発注者が求める性能については表 3.2.1.1 なども参考になる。音楽ホールなどで音響を重視するような場合は専門家の参画による協働もある。

図 3.4.1.6　天井のブリーフ（建築企画書）の例

天井高さについては、空間に求められるグレード、室面積と用途から導かれる望ましい気積（室容積）などから導き出される。過大な天井高は、照度確保の面、また気積の増大によるランニングコスト増となる。天井の段差については過去数度にわたる地震による天井落下被害の知見を十分に生かしたい。高い天井は開放感などの快適さに繋がる面は多いが、高所の天井にはそれだけの位置エネルギーがあることを伝えるべきである（表 3.4.1.1）。

機能維持に関しては、震災等災害時の BCP 拠点としての役割また一部の公共施設や病院など災害時には平常時を超えるサービス提供が求められることなどの想定に基づき、損傷制御レベルを設定する。表 3.3.2.1、表 3.3.2.2 などを参考にされたい。

想定する外力については、地震の場合特に上記の損傷制御レベル設定と大きく関係する。しかし損傷の原因は地震だけではない。地震以外の外力や損傷劣化原因も慎重に想定して

おく必要がある。

常時風や振動にさらされる所では、地震以外の時であっても落下のリスクが大きく、特段の配慮が必要である。経年による劣化や水分の蓄積、下地の腐食なども想定すべき外力である（表 3.4.1.2)。詳しくは「3.2　機能維持」、「3.2.4　各種劣化制御」の部分を参照されたい。

表 3.4.1.1　天井高さに影響を与える要因

グレード感、意匠	・ 天井の高さはグレード感に寄与する。 ・ 天井高すぎると壁面上部のデザイン難しい。
床面積 （心理面）	・ 床面積が大きくなると天井は高くなる。 広い床面積に応じた天井高さにしないと、圧迫感を覚える。 ・ 視野内に占める天井面・壁面の割合が重要。
室内環境 （生理面）	・ 天井高さは床面照度や明るさ感に影響。 ・ 天井高さは空調ボリュームに影響。天井が高いと室内温度の上下差がつきやすい。
火災安全	・ 天井が高いほど蓄煙効果が発揮され、煙が危険な高さまで降下する時間は長くなる。 ・ 火災時、高所からの天井落下は危険。
点検	・ 一定以上の高さでは、天井点検口による点検やメンテが難しい。

表 3.4.1.2　想定する外力の例

<table>
<tr><td colspan="2">地震</td><td>・ 当該天井の応答加速度で考えたい。
・ 主体構造、免震・制震装置の有無、階によって増幅などの度合いが異なる。</td></tr>
<tr><td rowspan="6">非地震</td><td>振動</td><td>・ 鉄道からの振動。
・ 近くの道路からの振動。
・ 生産装置や機械からの振動。
・ 上階のスラブの振動。</td></tr>
<tr><td>風、圧力</td><td>・ 風による繰り返しの力。
・ 通過列車等による風圧。
・ 空調による風圧。</td></tr>
<tr><td>湿気、塩素</td><td>・ 高い湿度による天井材の含水により天井材の重量増やビスの頭抜けなど。
・ 塩素などによる下地鉄骨の腐食。</td></tr>
<tr><td>温度変化</td><td>・温度変化による繰り返しの変形</td></tr>
<tr><td colspan="2">重量ある吊り物</td></tr>
<tr><td colspan="2">経年劣化</td></tr>
</table>

3.4.2　役割分担のあり方

1. 関係者の役割分担

> 建築物の天井等の非構造材に携わるすべての関係者は、それぞれの立場で、人命保護と機能維持において果たすべき役割と責任を認識し、新築・改修・復旧の全てにおいて、平時はもちろん地震時においても、脱落・落下等による人命に危険を及ぼすことの無い安全な建物を、社会資本として提供・維持しなければならない。
>
> すべての関係者は、それぞれが持つ役割と責務を果たすことで社会資本としての建築物を整備・維持し、結果として社会の信頼を得ることを目指す。

ここでいう「関係者」とは、発注者、設計者、施工者、専門工事業者、材料製作業者、完成後の建物所有者・運用者、保守・メンテナンス業者等の建設事業側はもとより、立法、官公庁等の行政、確認検査機関、学術研究者等の仕組みを司る側をも包括して示す。更に意匠、構造、設備その他関係する全ての業種においてその専門性分野には境界を設けること無く、すべてを含むものと解釈する。

天井等の非構造材の落下被害防止を考える場合、研究、企画、設計、審査、製作、施工、監理、運営まで一貫した役割分担の明確化と役割に応じた責務の履行が重要となる。以下、天井に関する「関係者」の役割分担別とその責務を整理して掲載する。具体的行動の指針については、本ガイドライン各章の記述を参照されたい。

立法府	国民の生命及び財産保護の観点から必要な法律を整備・更新し、社会資本としての建築物の整備・維持に必要な法律を司る。
行政機関	法律に基づき、社会資本の整備・維持に関する建築生産システム（建築物の整備・維持に必要な諸制度）を所管する。特定行政庁及び民間確認検査機関は確認申請図書の審査及び建物の完成検査を以って社会資本としての建築物の法適合を確認する。
発注者	社会資本としての建築物の建設を企画し、設計・施工・維持管理等の事業に必要な適正コストを負担する。建設に当たって必要な申請手続きを行い、所定の検査を受け、建物の引き渡しを受ける。
設計者	建築士法等の下、発注者との設計業務契約に基づき、関連法規を順守し建築物の発注・施工に必要な設計図書を作成する。設計図書や設計意図の伝達を通じて設計品質を確保する。
工事請負者	発注者との工事請負契約に基づき、関連法規を順守し発注図書に従い建築物を施工・完成させる。人命保護と機能維持の実現に必要な費用と工程を管理するとともに、元請業者として専門工事業者に施工を実施させ、天井の安全性に関し施工管理を以って最終的な施工品質を担う。

工事監理者	発注者との監理業務契約に基づき、発注図書の通りに現場が施工されていることを第三者として確認し、発注者へ報告する。専門家としての中立的位置付けにより、建築物の確実な品質を提供する。
専門工事業者	工事請負者との工事発注契約に基づき、天井（下地組及び仕上げ材）を施工する。天井及び下地類の施工品質について直接的な責任を担う。現場で施工を行う技能労働者の技術継承についても一定の責務を担う。
材料製作業者	決められた製品規格に基づき、所定の性能を持った構成部材（下地組及び仕上げ材）を製作する。必要な試験を実施して所定の性能を確認し、構成部材に要求される材料性能を担保する。
関連工事業者	直接天井工事（下地組及び仕上げ材）には関わらないが、完成までに天井内等で施工に関与する設備専門工事業者等がこれに当たる。結果として天井全体の安全性に深く関与する。
学術研究者	専門分野に関する知識を持ち、関連する最新技術の研究を推進・継続する。最新の知見と情報を集約することで専門家の養成を担い、建築学会等では共有の知見として広く公平に公開する。
建物所有者	完成した建物を資産として所有し、社会資本として租税を負担する。建物完成後天井全般全を継続して保全する所有者責任を担う。
建物運用者	建物完成後、建物全般を管理・運営する。建物所有者と一体となって（または同一で）天井を含む建物全般の継続的な安全性を担う。一定規模や用途の建物については定期報告を行うことで、建物を安全に維持・管理する。
保守ﾒﾝﾃﾅﾝｽ業者	建物完成後建物運用者との契約に基づき、劣化防止等の点検を実施し、報告する。また、状況に応じて劣化制御に必要な措置を提言する。
内装工事業者	入居者等の依頼に基づき、内装工事を行う。建物取扱い説明書や貸方基準上の制約条件等を順守し、必要に応じて家具等の転倒対策を行う。
入居使用者	取扱説明書や貸方基準上の使用制限等を順守し、賃貸借契約等に基づき建物を使用する。建物に異常を発見した場合にはただちに建物所有者・監理者に報告する責務を有する。

2. 立法府及び行政機関の役割

立法府の関係者は、国民の生命及び財産保護の観点から必要な法律を整備・更新し、社会資本としての建築物の整備・維持に必要な法律を司る。行政機関の関係者は、法律に基づき、社会資本の整備・維持に関する建築生産システム（建築物の整備・維持に必要な諸制度）を所管する。特定行政庁及び民間確認検査機関は確認申請図書の審査及び建物の完成検査を以って社会資本としての建築物の法適合を確認する。

立法及び行政機関の関係者は、天井等の非構造材の落下被害防止や損傷制御のために必要となる法令等を定め、または改定し、すべての関係者に対して周知を図る。同時に単なる規制の積み重ねがいつしか社会や技術の進歩に取り残され、逆に進歩を阻害する面に配慮し、許認可団体等との癒着によるいわゆる「規制の罠」に陥らないように体制的な見直しに努力し、常に新しい観点を導入し見直しを行う。行政関係者は、現状の関係法令や制度に問題が無いかを洗い直した上で、定められた法令等が適切に遵守されていることを継続的に確認し、合理的な範囲で公表する。

例えば、災害後の原状復旧に関しては、再発防止のために、より高い人命保護と損傷制御レベルが採用されるべきであるが、官庁施設の基準や民間施設の税法上の慣習から「原状復旧」される場合が多く、課題となっている。建物の安全性能を向上する「性能向上改修」に対しては、公的支援等の環境整備が重要となる（5.3節参照）。

また、官庁施設や民間施設で共通仕様書を準用している場合を除き、例えばJIS等の最低限の仕様が設計図書に明示されていない場合は、コスト優先による品質の低下を容認しているのが現状である。安全な建物の供給・維持のためには、従来の規格に囚われることなく、材料製造業者等による品質の高い製品開発を促すべきで、技術の進歩を阻害しない有効な施策が望まれる（「3.5　既存建築物の改修」参照）。

今後は人命保護や損傷制御に関する最新の知見や告示等の新基準をスムーズに社会に伝える仕組みが必要で、そのためには共通仕様書や詳細図等の公的な技術資料の一定水準への改定の他、単に規制強化ではなく災害後復興の多大なコストを減災行政へ向けるなど、「事前復興」の枠組みを目指す必要がある。

告示等の新基準の立案に際しては、学会等と最新の知見に関する情報交換を十分に行い、施行に関しては、事前に全国的なコンセンサスを得、建設行政に混乱の無いように十分なシミュレーションを行う。この段階で、規制側が許認可団体や規制される側に抱き込まれる「規制の罠」に陥らないように十分注意する。関係行政庁または確認検査機関は、建築主の提出する確認申請図書について、法令に基づく内容であることに加え、人命保護の確実な実現の観点を審査する。着工後は規模等に応じて中間検査を行うほか、工事完了時に完成検査を実施する。建物運用後は定期の報告を受け、建築物が社会資本として適正に維持されていることを確認する。

3. 発注者の役割

社会資本としての建築物の建設を企画し、設計・施工・維持管理等の事業に必要な適正コストを負担する。建設に当たって必要な申請手続きを行い、所定の検査を受け、引き渡しを受ける。建物完成後は適正に運用・管理する。企画・発注にあたっては人命保護等の安全対策に留意し、必要に応じて機能維持に関しての設計条件を設定する。

発注者は、建築物の建設・企画を行い、事業に必要となるコストを負担する。天井等の非構造材の落下被害防止のため、人命保護を優先し必要に応じて機能維持を図る発注条件を設定する。安全に関する明確な設計図書の作成を設計業務として発注し、同時に中立な立場で現場を確認する監理業務を発注する。また適正な施工及び品質管理を行う十分な技術力を持つ施工者を選択し、これを適正価格で発注する。これらの契約に関し、業務の報告を実施させると同時に報告を受け、これを確認する。建物の完成時には使用に先立ち法令に基づき検査等を受ける。

建築物の建設が事業である限り官民に関わらずコストには当然の制限があるが、事業のコスト配分において、人命にかかわる天井等の非構造材に安易なしわ寄せがあってはならない。この意味において、建物の安全に関する発注者の役割は重要である。

建物の完成後は、建物の維持管理業務を適正に行い、または建物管理者に行わせ、天井等の非構造材の落下被害防止のために適正な保守・メンテナンスを行う。また、法令に基づき、定期の報告を行う。

4. 設計者の役割

発注者との設計業務契約に基づき、建築物の発注・施工に必要な設計図書を作成し、設計図書や設計意図の伝達を通じて設計品質を確保する。設計者は、天井等の非構造材の設計段階において、意匠・構造・設備等の設計関係者相互の責任区分を明確とし、天井等の落下防止の設計品質を確保する。また、発注者と十分に意思疎通を図ったうえで建物の性能を明確に規定し、天井等の落下防止の設計仕様や要求品質を設計図書に明記する。 機能維持の条件整理は発注者が行うが、人命保護は設計者が中心となって行う。

ここでいう「設計者」とは建築士法上の設計者を意味し、建築基準法において建築士でなければ設計出来ない建物を設計した場合の設計者を意味する。しかしながら実際の設計業務では、士法上の設計者の他、主にデザインを行う意匠設計者や有資格者でない者も関係する。一方、設計・監理は、「設計・施工・監理一貫」、「デザイナーによる意匠設計と施工者による実施設計・施工」、「専業設計事務所による設計・監理」等、様々な体制が存在する。しかしながらどのような体制であっても、確認申請上の法的な「設計者」は存在し、人命にかかわる非構造材の落下防止については、この「設計者」が設計業務全体としての

責務を負うべきであることを改めて共通認識としなければならない。

意匠設計者は、天井設計の過程において、意匠面のみならず天井の設置高さ、材料の仕様・構成について設計責任を負担する。
設計者は、ブリーフィング等のレビューを実施し、発注者が設計条件を設定するために必要な関連情報を十分に提供する。その上で発注者の意志を尊重し、設計内容に関する合意形成を行う。また決定に関する経緯を記録に残し、発注者と確認を取り交わす（「3.4.1　発注者との合意形成」参照）。
室内空間の高さや天井の仕様・形状を設定するにあたり、機能と空間構成等について事前に条件整理を行い、安全評価法等を用いて万が一の脱落被害を事前に想定し、人命保護の確保を優先する。（「3.1.1　安全性評価法」参照）
各種の外乱に対しては人命確保を満足したうえで、設計条件に基づき耐震設計等の損傷制御の設計を行う。機能確保は、構造設計者が算出する構造条件を基に、天井面水平応答加速度等の各部の「設計条件」、及び天井・非構造材の耐震クライテリア「設計目標性能」を設定する（「3.2　機能維持」参照）。
具体的な設計図書の作成に当たっては、材料・形状・納まり等の弱点を把握し、あらかじめ対策を講ずるとともに、最新の知見を基に具体的な設計提案を行う（「3.2.3　各種耐震工法による損傷制御の実態」参照）。
天井下地の仕様に関しては、公共建築工事標準仕様書（公共建築協会編）以上のものを使用する等、安易な材料選定とならないよう設計図書への記載に配慮する（共通工事標準仕様書 14 章金属工事 14.4.2 材料参照）。

意匠設計者は、構造、設備他の設計者との連携を取り、全体として整合のとれた設計図書を作成する。特に意匠設計者と構造設計者等が別組織である場合には、確認申請上の「設計者」となる者がこの責務を負うことに注意する。また、設計段階で必要に応じて材料製作者の協力を得て技術的検討を行い、天井等の脱落防止及び機能維持のための計算を行うとともに、具体的な仕様を設計図書へ盛り込む。

構造設計者は、発注者、意匠設計者等と十分に調整の上、建物の耐震性能を規定し、非構造材の設計条件を意匠設計者等に正確に伝達する。非構造材の設計には構造体の設計条件が不可欠であり、固有周期や層間変位角等の構造体性状に留意する。構造体の固さによって非構造材の損傷の程度が異なることに留意し、建物全体のバランスを考慮し、非構造材等の損傷制御に活かすよう最新の基準や知見を耐震設計に反映させる。

設備設計者は、天井内に設置される設備機器、配管等の落下被害防止について、耐震措

置に配慮する。地震時に天井面に水平荷重を負担させる設備機器、器具類がある場合は、事前に意匠設計者に必要条件を伝達し水平荷重として見込む。また、天井内の非構造材に対し、地震時の変位を想定した十分なクリアランスを確保する。天井面での納まりの関係から天井面を拘束することとなる設備類は、天井の非構造材とは自由に挙動できる様、納まりや支持方法に配慮する。

5. 工事請負者の役割

発注者との工事請負契約に基づき、発注図書に従い建築物を施工・完成させる。人命保護と機能維持の実現に必要な費用と工程を管理するとともに、元請業者として専門工事業者に施工を実施させ、施工管理を以って最終的な施工品質を担う。

工事請負者は、発注用設計図書の見積もりに際し、設計図書記載の有無に関わらず、天井等の非構造材の落下被害防止についての配慮について必ず設計者に確認する。施工段階の初期において、発注図書にある仕様・性能を確保するに足る技術力を持った専門工事業者・材料業者・設備専門業者等の施工関係者を選定する。また、施工業者相互の責任区分を明確とした上で技術力を十分に把握し、必要に応じて技術指導を行う。

専門工事業者や設備専門業者等に施工させるとともに、契約に基づき最終的な施工確認を行うことで天井等の非構造材の落下防止に係る施工品質を確保する。従って、建築・設備等の関連工事間調整を担うことに注意する。実際の施工段階では、天井仕上げ工事施工前の天井下地確認可能な時期に、損傷制御の設計仕様等の確実な施工を確認する。

天井等の非構造材の落下被害防止についての配慮に対し、例えば非 JIS 規格の一般材を使用する等のコストダウンを伴う合理化提案については慎重に対処し、発注者・設計者の承認無しに設計仕様を変更しない。また、施工品質の確保のためは十分な施工期間が必要であり、安易な工期短縮によるメリットを強調することなく、必要工期を確保する。

建物完成時点では、天井等の非構造材の落下防止に係る使用上の注意点や必要な保守・メンテナンス等の必要事項を、設計者と協同して取扱説明として明示し、発注者へ受け渡しを行う。

6. 監理者の役割

監理者は、発注者との監理業務契約に基づき、設計図書の通りに現場が施工されていることを第三者として確認し、発注者へ報告する。専門家としての中立的位置付けにより、建築物の確実な品質を提供する。人命保護と機能維持にとって重要な部位については、重点監理を行うとともに、設計品質の実現についての関連検査は省略しない。

監理者は、監理業務の初期の段階で、天井等の非構造材の落下防止に係る設計仕様等の

設計内容を十分に把握し、不明な事項がある場合は発注者及び設計者に確認する。また、設計者・施工者及び関連する全ての専門業者相互の責任区分を明確としたうえで、施工手順の確認・施工図の確認・材料の検査・施工の検査等を行い、天井等の落下防止の施工品質を確認する。

施工に先立ち、施工者等が提出する施工図、施工計画書等を確認し、天井等の落下防止に関する仕様や施工方法が適切に記載されていることを確認する。記載が十分でない場合は施工者等に対し、必要な技術指導を行う。また、品質確認の結果を発注者及び設計者へ報告を行うとともに、関係者間で共有されていることを確認する。

天井等の非構造材の施工段階において、直接天井等の施工を行う専門施工業者や関連施工業者が適切に工事を実施していることを施工者が把握、管理しているかを確認する。また施工段階において施工者に対し、天井仕上げ工事施工前の天井下地確認可能な時期に、損傷制御の設計仕様等の確実な施工を確認させる。天井内の設計仕様等が確実に実施されていない場合は仕上げ工事をさせてはならない。

監理者自らは、監理業務の契約範囲内で直接施工状態を把握するとともに、発注者へ報告する。工事完了時には設計者と調整の上、必要な諸官庁の検査を受検し検査済証を発注者へ納める。

7. 専門工事業者の役割

専門工事業者は、工事請負者との工事発注契約に基づき、天井（下地組及び仕上げ材）を施工する。天井の施工品質について直接的な責任を担う。人命保護と機能維持にとって重要な部位については、その品質確保に対し妥協しない。技術の継承を意図し、現場で施工を行う技能労働者の技術継承についても一定の責務を担う。

専門工事業者は、天井等の非構造材の施工段階において、元請である施工者等の施工関係者相互の責任区分を明確とし、製品の材料品質を確認するとともに、自ら施工確認を行うことで、天井等の落下防止の施工品質を確保する。天井等の非構造材の落下防止に係る設計図書を十分に理解するとともに、工事の品質を直接に担う持つものとして、必要な技術を維持・更新する。

工事に先立ち、設計図書に基づき、設計図書の仕様を満足する施工図・製作図等を作成し、設計図書を満足することを計算等によって確認した上で根拠を提示し、施工者の承認を受ける。工事に必要な材料を調達し、その品質等を直接確認する。

工事にあたっては定められた施工方法を確実に実施し、施工品質を確保する。必要な技能労働者を確保し、同時に工事遂行に必要な技術指導を実施するとともに、施工技術の継承を担う。

8. 材料製作業者の役割

材料製作業者は、決められた製品規格に基づき、所定の性能を持った構成部材（下地組及び仕上げ材）を製作する。必要な試験を実施して所定の性能を確認し、構成部材に要求される材料設計性能を担保する。人命保護と機能維持を優先し、安易な妥協は行わない。

材料製作業者は、強度等の品質については所定の試験等により確認し、必要十分なものを製作し市場に供給する。天井鋼製下地材料は、現状では、例えば JIS 規格外の一般品も多く流通しており、コスト優先による品質の低下を容認している状態にあるが、材料製作業者は天井落下等の被害に鑑み安易に規格外等の安価な製品は製作しない。むしろ、自らが保持する技術を以って天井等の非構造材の落下防止に係る製品を企画し、また技術開発に協力し、高い品質の製品を積極的に市場へ提示する。

施工段階においては、製品の品質を保証するため、納入時に品質に関する資料を施工者へ提出するとともに、品質に関する記録を自らも一定期間保管・保存する。

材料製作業者は、設計時点で設計者の求めに応じて、より専門的な立場で天井材料の強度計算等の技術的検討に協力する。

天井仕上げ材料製作業者は、万が一の脱落時にも安全性の高い天井材の製品を開発し、積極的に市場に提案する。

9. 関連工事業者の役割

直接天井工事（下地組及び仕上げ材）には関わらないが、施工時に天井内で同時に行われる関連工事の工事業者であり、設備専門工事業者・プラント工事等の別途特殊工事業者が該当する。天井下地との干渉等、結果として天井全体の損傷劣化や機能維持に深く関与していることを自覚する。

関連工事業者は、天井等の非構造材の関係では、天井内にて工事が発生する電気設備工事業者、機械設備業者、プラント工事業者、別途特殊工事業者等がこれに該当し、単独の工事としても当然の安全性能を確保する。

建築工事の天井下地材に対して機器等の荷重を負担させる場合は、事前に工事請負者と意思疎通を図るとともに、十分な調整を行う。天井下地等に対して十分なクリアランスを確保し、水平震動時にも有害な干渉が発生しない様、実際の現場施工を実現する。単独で設置する天井内の設備機器等に対しは、常時の垂直荷重に加え地震時の水平荷重に対しても必要な脱落対策を講ずる。

10．各術研究者の役割

学術研究者は、専門分野に関する知識を持ち、関連する技術の研究を継続する。人命保護の観点や機能維持のための必要性能に関して整理を行い、すべての関係者へ情報発信する。技術の継承を意図し、専門家の養成を担う。

設計者、施工者、専門工事業者、材料製作業者はもとより、司法、官公庁等の行政、学術研究者等、各立場で技術研究に携わるすべての専門家は、脱落被害の原因を解明するとともに、現実的な再発防止策を探究し、建築業界へ具体的に提案・提示する責務を負う。

なかでも学術経験者は、天井等の非構造材の脱落被害に対して徹底してその原因を追究し、解明しなければならない。また、市場の経済原理に左右されない学術的立場から、従来の方策に縛られない自由な発想の下で、再発防止のために必要なあらゆる技術的提案を行う。特に建築学会は、天井等の非構造材の落下防止に係るすべての技術者を代表し、JASS等の既存の指針や解説を更新し、必要な最新情報を積極的に発信する。

一方学術経験者は、安心で安全な社会資本の提供のために、継続して関連技術の蓄積を行うとともに、専門家を養成する役割を担う。

11．建物所有者・管理者の役割

建物所有者は、完成した建物を財産として所有し、建物完成後天井全般の安全性を継続して保全する。同様に建物の運用を担う建物管理者は、建物を安全に運用・管理する。
建物所有者・管理者は、建物完成後の工事に関しても関連する専門工事業者等を管轄し、一定の建物については定期報告を行うことで、建物を安全に保つ。地震等が発生した場合は天井等の損傷状態を確認し必要に応じて補修、修復を行う。建物完成後に発生する工事等においては、関係する工事業者間の調整を図る。

建物所有者及び竣工後建物を管理する管理者等は、設計監理者及び施工者からの建物取扱い説明書等の内容を十分に理解し、天井等の非構造材を含めた建物の全てを安全に運用し、また入居者等に対して安全に使用させる。また、法令に従い定期の検査を実施し、関係行政機関へ報告する。

通常時の保守・メンテナンスに加え、地震や台風等の外乱が発生した場合は、天井等建物各部の損傷を確認し、必要に応じて補修を行う等、現に存する全ての建物に対して人命保護等の安全性を確保する。また、常に建物の状況を把握して改修時期の見極めるとともに、耐用年数等を考慮し建物の解体廃棄等の必要な判断を下す。

建物所有者及び竣工後建物を管理する管理者等は、人命保護や機能維持の継続のために、既存建物の情報を必要資料と共に引き継ぐ。

12. 建物完成後の保守・メンテナンス業者・内装工事業者等の役割

　建物メンテナンス業者は、建物完成後建物運用者との契約に基づき、劣化防止等に必要な点検を実施し、報告する。また、劣化状況に応じて劣化制御に必要な措置を提言する。内装工事業者は、入居者等の依頼に基づき、内装工事を行う。建物取扱い説明書や貸方基準上の制約条件等を順守し、必要に応じて各部位の損傷制御を行う。

　建物の保守・メンテナンス業者は、建物完成後建物運用者との契約に基づき、定期にまたは随時、必要な点検を実施し、報告する。また、部材の取り換えや改修工事等、劣化状況に応じて劣化制御に必要な措置を提言する。

　内装工事業者等の建物と別途となる工事業者は、建物管理者や入居者の依頼に応じて間仕切り工事や家具等の持ち込み物の耐震固定等の安全対策を行う。貸方基準等を順守することは当然とし、非構造材等へ過度の負担がかかる場合には必要に応じて設計者等へ条件を確認する等、十分な安全性能を確保する。

13. 建物使用者の役割

　取扱説明書や貸方基準上の使用制限等を順守し、建物を使用する。建物に異常を発見した場合にはただちに建物所有者・管理者に報告する責務を有する。

　入居者等の建物使用者は、荷重制限や使用制限など貸方基準上の使用制限等を順守し、建物を適正に使用する。特に天井等に想定以上の荷重をかけない等、建物完成後の保守・テナント工事等において十分に配慮する。貸方基準上の使用制限等に不明点がある場合は、建物管理者等に確認する。

　建物使用上において、建物に何らかの異常を発見した場合には、ただちに建物所有者・管理者に報告する。

3.4.3　設計・監理者の留意事項

人命保護や機能維持の確保において、設計者・監理者の役割は非常に重要である。完成後の建物に関しても、設計者・管理者は必要な情報提供を行う。

天井等の非構造材の落下事故の無い安全な建物を社会資本として提供する場合、完成する建物の人命保護や機能維持に関する品質の確保という視点で見ると、設計者・監理者の役割は非常に重要である。

現場施工段階で施工者が実施する品質管理についても設計図書で規定されることが多いため、設計図書の作成は完成する建物の品質の確保にとって非常に重要な役割を果たす。設計図書が曖昧であると、解釈されうる最低限の仕様での施工となり、安全性が劣ることにつながる。

前述の通り設計者は、天井等の非構造材の設計段階において、意匠・構造・設備等の設計関係者相互の責任区分を明確とし、天井等の落下防止の設計品質を確保しなければならない。以下現状把握されている天井に関する設計・監理の知見における、人命保護と機能維持に関する配慮事項を記載する。

1．企画・基本計画段階

設計者は、設計の企画段階から、新築・改修・復旧のフローに沿って、意匠・構造・設備等設計にかかわる関係者の役割を明確とし、業務契約書締結以前に建築主に対し、設計体制についての重要事項説明を実施する。

設計ＪＶ等、設計者が複数存在する場合は、確認申請上の「設計者」を明らかとし、関係者間の責任区分を明確とした協定書を作成する。また設計・監理段階での発注者との合意の手順や品質確認の具体的手法を説明・提案し、設計・監理業務について、発注者との間で認識を共有する。

設計フロー関しては、「3.3.1　新築・改修及び復旧の進め方」を参照する。

留意すべき関係業務

- 建築士法上の重要事項説明の実施（設計担当者、契約内容等）
- 設計関係者の役割分担の確定
- 設計監理契約の締結
- 合意手順等の共有とブリーフング作業
- 事業概算費用の合意

2．基本設計段階

意匠・構造・設備等の設計関係者間で十分な協議調整を行い、天井等の非構造材に関して人命確保と機能維持に関する設計条件を明確とする。また、建築物の構造形式やこれに

伴う設計条件等の基本事項を発注者に説明する。

留意すべき関係業務

- 関連法規制の確認
- 人命保護の具体的対策
- 構造形式及び非構造材の設計目標性能の決定
- 落下被害防止計画の検討・策定
- 発注者への説明・合意
- 基本設計概算の合意

設計の勘所

- 広域・地域防災計画
- 避難施設等への建物用途の転用計画と建物ＢＣＰ
- 万が一脱落した場合の人体への影響の理解。
- 重要室や避難経路等の建物重要部位の把握
- 大規模天井や重量天井の危険部位の把握
- 吸音・遮音等、天井に期待する設計性能の整理
- 天井形状等の意匠と天井面平面剛性の把握。
- 在来天井とシステム天井との種別特性の把握
- 柔構造や塔屋階における地震力の増幅についての知見。
- 大スパン構造における鉛直地震力の増幅についての知見。
- 天井吊り高さによる固有周期と共振現象についての知見。
- 直天井化の事例（本ガイドライン 4.1 参照）

3. 実施計画及び発注段階

発注図作成時点等の主要な時期に、天井等の非構造材の安全性や損傷制御方針等の基本的性能や主要な機構を建築主へ説明し、合意を得る。

発注図書作成に当たっては、意匠・構造・設備等設計にかかわる関係者間で十分に打ち合わせを行い、当初の設計目標が達成されるよう、関係諸元を実施設計図書に明示する。また、意匠、構造、設備の各設計図書の整合を確認する。また発注手続きにおいては、設計図書の内容を十分に説明し、質疑がある場合には明確に回答する。

留意すべき関係業務

- 基本的性能や主要な機構についての建築主への説明
- 具体的落下被害防止対策の策定
- 材料製作業者との技術調整
- 天井等の非構造材の安全性や損傷制御方針等の設計図書へ明記
- 発注者との設計図書の合意

- 法令確認と確認申請の実施
- 発注時の設計説明
- 質疑回答等の発注業務

設計の勘所

- 天井下地を支える構造体の種別選定と性状確認
- 例えば JIS 規格または JIS 規格を超える材料仕様の設定
- 各所接合部位の締結性能の確認
- 必要に応じた実大試験等の設計図書への記載
- 天井に付加される間仕切り荷重等の設計条件の設定
- 万が一の場合のフェールセーフ対策の立案
- 設計仕様としての現場溶接禁止の推奨
- 災害時の避難経路等の確保
- 長期保全に向けての劣化防止対策の明記
- 天井内設備等現場施工に問題の無い範囲までの納まりの確認
- 機能維持等の必要に応じた端部クリアランスの確保
- その他最新の知見

4. 現場監理段階

設計者は、天井等の非構造材に関する人命保護や機能確保等の設計意図を、着工後速やかに工事請負者へ伝達する。質疑等に回答することで、現場段階での品質管理について意思疎通を図る。

監理者は、設計品質の造り込みのために、工事請負者と意思疎通を図り、または質疑に対応し、現場が最終的に設計図書の通りに施工されていることを確認する。特に天井に関する人命保護や機能確保等の設計意図が確実に実施されていることを確認する。

留意すべき設計関係業務

- 施工者への設計意図の伝達
- 設計変更が生じた場合の適正な変更対応

留意すべき監理関係業務

- 施工計画書の確認
- 施工要領書の確認
- 損傷制御対策の具体的施工方法の確認
- 耐震性能計算書及びブレース等についての施工図の確認
- 設備工事計画等との干渉の確認
- 現場施工品質の現地確認
- 官庁検査の受検支援

- 取扱説明の作成と完成引き渡し書の確認
- 完成後の定期検査への立ち合い

5. 建物完成後

1980 年の新耐震基準の前後に関わらず、元々一定の必要性能を持っていない天井下地や、建設後の経年劣化や過去の外乱（地震や風圧、常時震動等）により脱落等の危険を内在している軽量鉄骨製の天井下地は、国内に相当数存在しているといわれている。そのどれもが今後発生する大地震にさらされ、相当数の被害が発生する可能性を秘めている（「3.5 既存建物の改修」を参照）。

設計者・監理者を中心とした関係者は、過去に携わった建物の所有者・管理者に対し、正しく情報を伝える必要がある。このままでは非常に危ないという状況であることを、「関係者」の全てが認識しなければならない。

既存天井に関する関係者の配慮事項

- 関係設計基準や指針等の早急な見直し
- 天井の安全性を常時確認するための制度・指針等の策定
- 天井改修に係る補助金等の財務的支援の拡充
- 関係者による情報開示
- 新耐震以後の構造基準で建てられている建築であっても、耐震安全性と関係なく危険が存在する旨の公表（慎重な対処が必要）
- 新耐震以前の構造基準で建てられている建築は、耐震安全性の面で更に危険である旨の公表（慎重な対処が必要）
- 既存天井改修方法の確立
- 現状危険な天井への緊急の脱落防止策の実施
- 汎用性の高い簡易な損傷制御工法の開発
- 自主規制や業界基準等の見直し

3.5　既存建物の改修

人命保護が確実でない天井等の非構造材は速やかに改修あるいは撤去する。

一般に天井材等の非構造材の耐用年数は構造躯体に比べてはるかに短い場合が多い。また天井脱落の危険性は、それを支えるシステムの中で最も脆弱な部分によって決まる場合が多い。しかし、広大でアクセスの悪い天井面の劣化や損傷状況を目視等の点検によって完全に把握し、損傷脱落を完全に防止することは非常に困難である。万が一、脱落した場合に人命に危害を及ぼす可能性を考えれば、安全性評価を満たさない天井材は速やかに改修あるいは撤去し、人命保護の確保を最優先とした天井に変えていくことが必要である。本ガイドラインではこれらの改修方法についても述べている。

竣工後の建築物に行われる維持保全行為を　修繕、更新、改修　に分けて考えるとすれば、それぞれは以下のように定義することができる。

修繕：劣化の速度を弱め、長持ちさせること。
更新：劣化した部位を初期水準に戻すこと。原状復旧。
改修：劣化した部位の性能を初期水準以上に改善すること。

本ガイドラインで繰り返し述べているように、天井等の「非構造材」は「構造材」とは期待される機能も設計施工の状況も全く異なるものである。

(a)建築各部の経年変化　　(b)ある瞬間での各性能水準の関係

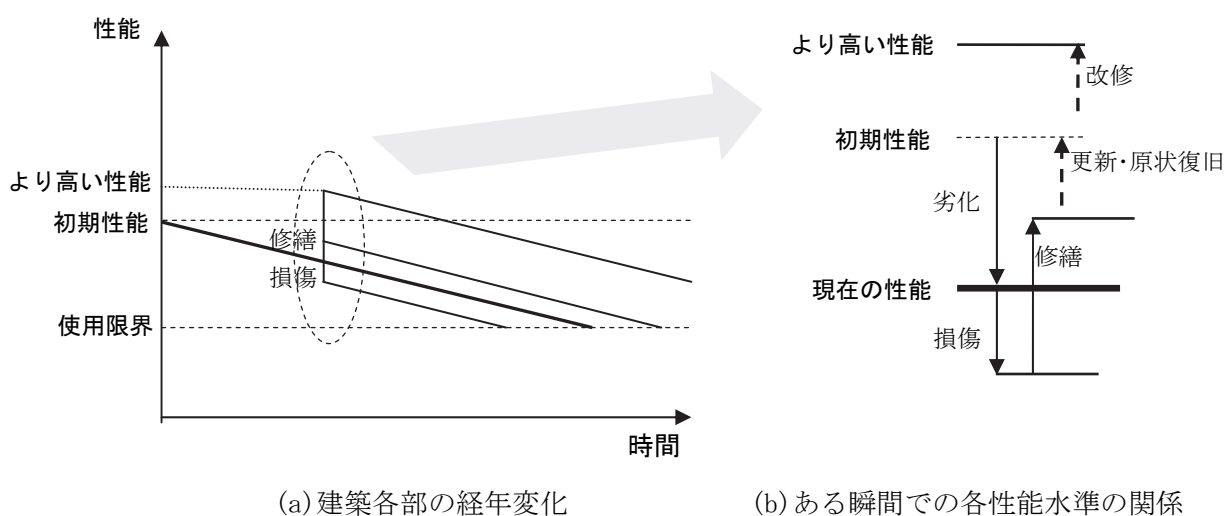



図 3.5.1　建築各部の経年変化と維持保全の概念図

設計者や施工者など建築物を造る側は、非構造材は汚れや陳腐化、あるいは機械的劣化といった機能上の要因で建物寿命の中で何度か更新されることを期待している。その上で、設計者は機能や経済性を重視し、施工者は大面積にわたる仕上げ面を短期間に仕上げるための施工性や美観を優先する。従って「非構造材」に「構造材」と同等の強度や耐久性を実現しようとすれば著しく合理性や経済性を欠いたものとなってしまう。このような中で天井材等の非構造材の強度や耐用年数は、それを支えるシステムの中で最も脆弱な部分によって決まり、構造躯体に比べればはるかに低く短くなる。

ところが、管理者や使用者側は、天井等の非構造材も構造材と同様に長期にわたって利用し続けようとする場合が多い。この場合、管理者側は、これら非構造材の劣化状況を確認する必要性が出てくる。しかし、前述のような理由から脆弱な部分が散在する可能性があるシステムであり、広大な面積にわたり配置された非構造材の劣化状況を目視や打音検査等で確実に把握し続けることは困難である。

従って、維持管理や点検によって確実に予防することができない場合、万が一脱落した場合に人命に危害を及ぼす可能性を考えれば、安全性評価を満たさない天井材は速やかに改修あるいは撤去することが必要である。

改修の方法としては、安全性評価法で安全と判断される天井材を設置するか、天井材を用いない直天井とする方法がある。また、安全性評価をクリアしない天井を利用し続ける改修方法として、フェイルセーフを設置するという方法もある。重量天井がどうしても必要な場合は、下地から天井面に至るまで構造として改修する準構造化を採用する方法もある。

1. はじめに

関係者は、既存の天井の落下事故防止のために現状の天井の安全性評価を行い、必要に応じて改修し、人命保護を確実に実現しなくてはならない。またその安全性を維持しなければならない。

2012 年 10 月に国交省は「建築物ストック統計」[1]において、非住宅用途の床面積を 18 億㎡強と発表した。そのうち、事務所、店舗が 32.8%、工場、倉庫が 44.7%としている。仮に、事務所、店舗の床面積の 70%、工場、倉庫の 10%に吊天井が張られているとすれば、約 5 億㎡の天井のストックが想定される。仮定の天井ストック量の正確さは別にして、その膨大さに着目したい。東日本大震災では、非常に広域で強い地震動を受け、夥しい数の天井が脱落・崩壊した。同統計で、1981 年新耐震基準制定以前に建設された非住宅用途建築の比率は約 33%としている。当然構造体の耐震性が不足する場合、非構造材の損傷危険度はさらに高まるものと思われる。また、2009 年の出荷ベースで JIS 規格品に比して耐力の劣る、いわゆる一般品・普及品の鋼製下地が約 80%も流通している[2]。JIS A6517 天井下地材のみで落下事故防止の実現や耐震化が困難であることは 3.2.3 項に述べたとおりであり、さらに脆弱な一般品・普及品で天井を構成した場合には、脱落リスクは非常に高くなるのは自明である。また施工年次の古い比較的旧式の天井には、耐力評価が困難な木製下地や経年劣化で腐食の進んだ下地材等が散見される（図 3.5.3～10)。構造体が新耐震基準に適合していても、損傷危険度の高い非構造部材は非常に多く存在している、と考えるのが自然である。プール施設等での劣化によると思われる突然の天井崩落や、交通施設等における振動や風が原因と思われる天井被害等がしばし報告されている。約 5 億㎡の天井はこういった脱落リスクを潜在的に抱えており、これらを適切に、早急に改修しない限り同様の被害が繰返し発生し続ける。

そこで、関係者の全てが「既存の吊り天井をそのまま放置することは非常に危険である」という認識を共有し、適切な改修を着実に実施することが肝要である。耐震性能向上だけではなく、外装材においてシールや塗装を一定の年限でメンテナンスするのと同様に、天井材についても経時変化に対する維持管理が重要である。繰り返される天井脱落による人的・社会的・経済的損失を未然に防ぐために、「人命保護」の確実な実現と、必要に応じた機能維持のための耐震補強や湿気、振動などに対する劣化制御対策等を適切に講じることが喫緊の課題である。

ここでは、既存天井の落下防止対策の有無や耐震性能・劣化状況等を調査し、着実に、そして適切に対策を実施するための手法を紹介し、膨大な量の既存ストック天井の改修を促進することを目指す。

2. 改修計画の進め方

(1) 天井改修計画の全体の流れ

天井の改修を実施する場合、(1) 安全性評価法による確実な人命保護の実現、(2) 必要に応じた機能維持性能の実現、を目的とする。

天井の改修を行う際の、計画の進め方の事例を示す（図 3.5.2 参照)。

①事前準備

ここでは、発注者の要求事項、依頼事項を確認するとともに、設計図等を基に天井の診断に必要な情報を整理する。

発注者の要求事項、依頼事項の確認、関与すべき関係者は、「2.3　設計の進め方」、「3.3.1 新築・改修及び復旧の進め方」を参照されたい。人命保護対策の実施を必須事項とし、例えば地震に対する機能維持が要求される場合には、設定された地震規模での耐震性の確保や、許容される損傷の形態や程度、復旧や点検の方法、事業継続性に関する要求事項等を確認し、継続協議となる事項の確認を開始する。また、防塵性や断熱性、耐朽性、気密性、遮音性、音響性能、耐風圧性能等の天井に対するその他の要求性能についても確認をしておく。

設計図書などからは、天井高と天井材質、調査箇所の優先度、調査のための準備事項(足場、高所作業車の要否等)を確認し、必要な準備を行う。

②調査・打合

まず、室内の状況を観察し、天井全体の形状、天井高、天井材等を確認し、安全性評価に必要な情報を入手する。不明点は設計図書を確認するか、以降の詳細調査にて情報を入手する。

この時点のチェックポイントは、クリアランスの有無、段差の有無、設備機器の状況、懸垂物の有無、天井面のシミや過去の取替の痕跡等である。

次に、既存の点検口等から天井ふところ内を観察し、湿度や風圧、振動の状況、天井下地の状況や天井の材質、重量、形状、面積の確認、過去の地震の影響や改修の履歴、結露・湿気・水漏れの状況や劣化状況等を把握し、設備機器の状況も確認する。

必要に応じて点検口の新設も行い、詳細調査計画を立案するための材料を収集する。

詳細調査は、収集した材料から調査項目を調整し、その後の改修計画に必要な情報を得ることを目的とする。改修計画の合意形成には見積・積算作業も不可欠であるため、この段階で改修工法の選定に必要な情報（例えば躯体や胴縁、周囲の壁、根太、柱・梁などの構造体の状況）や、数量、計画・施工上の制約条件や注意点なども把握することが望ましい。調査項目の事例は表 3.5.1 を参照されたい。

③改修計画および改修工事

調査が完了し、天井の現状が把握できた時点で、改修の要否・方法についての協議に移行する。

まず、人命保護のための安全性評価を行う。使用されている天井材と設置高さが安全領域に入っていること、または確実な天井落下防止対策が実施されていることを確認し、そうでない場合や人命保護上危険と思われる状況が見つかった場合には、人命保護を確実に実現するための改修が必要である旨を発注者・建物所有者等に報告する。この時点で劣化・損傷を受けた部材の応急対策等が必用な場合も散見されるため、応急対策を含めた急な対策実施を促す。

さらに、①で協議を行った機能維持性を確保するための対策案について、調査結果を反映して発注者・建物所有者等との合意形成を図る。

費用対効果を含め、改修計画がまとまった段階で改修工事に移行する。

天井耐震改修計画のフロー

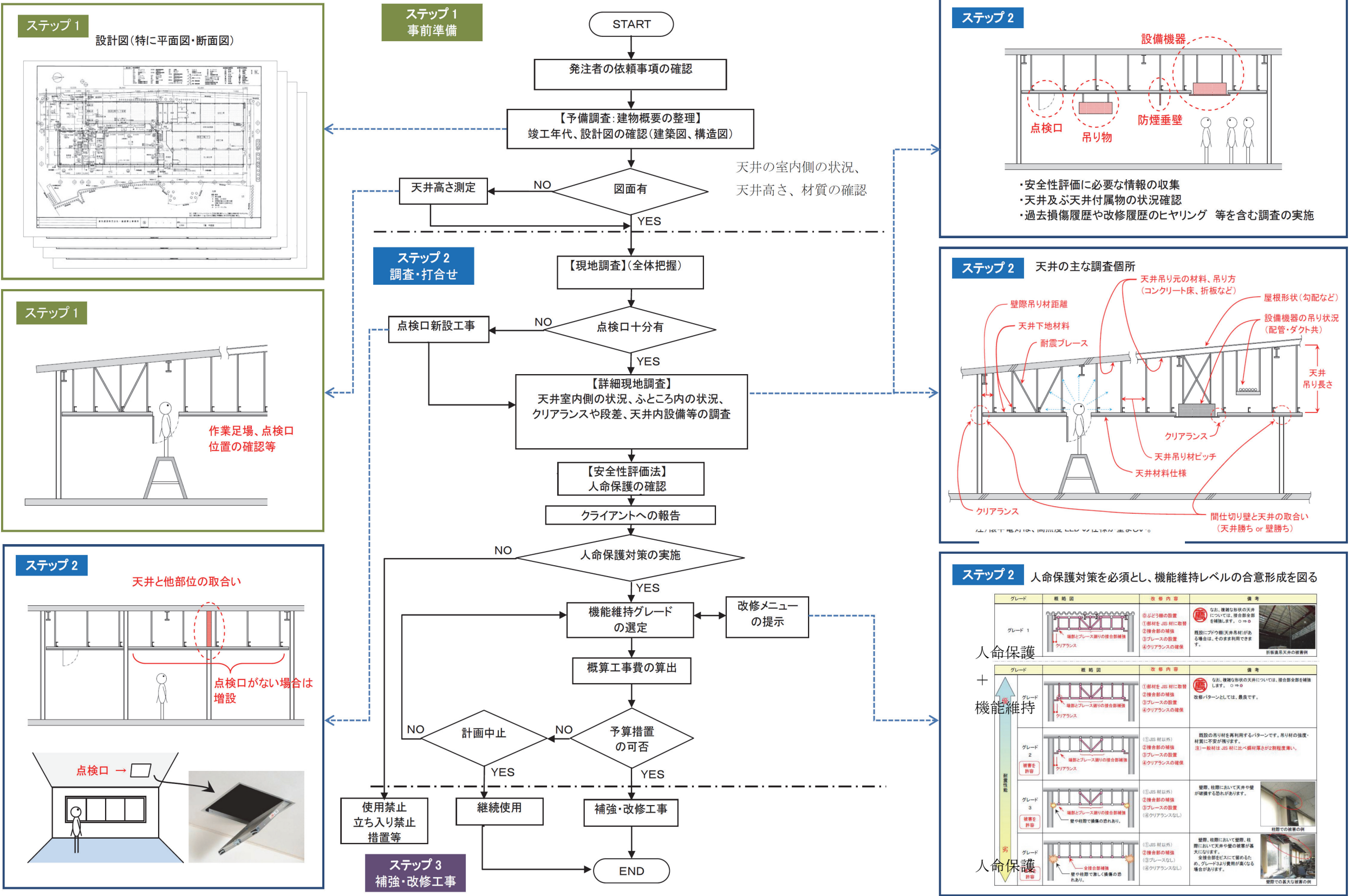



図 3.5.2　天井改修計画のフロー（例）

(2) 天井の調査

天井の調査は、まず人命保護の実現のための情報収集から始める。さらに機能維持が要求される場合、天井の損傷につながるすべての項目を包含して調査を実施する。

天井材、天井下地材のみならず、建築物の構造種別、天井の位置(階数)、吊元、天井ふところ内に位置する天井以外の部材・部品、天井端部に位置する壁、柱、その他の周辺部位、天井に取り付けられた部材・部品等を包含し調査する。

主な天井の調査項目と観察のポイントについて、下記に事例を示す。

表 3.5.1　天井診断項目の例

調査項目	調査内容	観察のポイント
構造種別・形態	S 造、SRC 造、RC 造ほか 建物形態	地震、風その他外乱の天井への影響等の確認 構造体の偏心、風の縮流、地震時の変形など
天井設置状況	湿気、水濡れ、風圧、振動の影響の有無ほか	人命保護や機能維持上の影響・課題の把握
天井設置階	当該の天井の設置階	同上
天井高さ	当該天井の床面からの高さ	安全性評価法による人命保護実現状況
天井材質と重量	当該天井の材質、単位面積当たりの重量	安全性評価法による人命保護実現状況 耐震化を検討する際の外力設定
天井面積	当該天井の張り面積	損傷危険度の評価 耐震化を検討する際の外力設定
天井形状	段差や曲面の有無	落下防止、損傷防止の重点対策部位 同一天井の吊り長さの違い等の把握
用途	対象室の用途	被災リスク、事業継続性の検討
劣化状況	損傷、劣化、錆、漏水、ゆるみ等	健全性、経時変化、劣化状況等の確認・評価
天井下地材	下地材の形状、肉厚等 JIS 材等の使用	天井耐力評価 改修対策後の耐力・信頼性の評価
天井ふところ	天井仕上面から吊元までの距離	地震時の天井への応答等の分析 ぶどう棚の要否検討

耐震要素①	ブレース等の耐震要素の有無	当該天井の耐震性評価
耐震要素②	ブレース等の設置個所数	当該天井の耐震性評価
接合部	接合部金物の状況 補強の有無、溶接の有無と状況	当該天井の耐震性評価 力の流れの確認
ブレース接合部	吊元の固定状況、吊元との距離等、下部の固定状況、下部の固定部材の強度	当該天井の耐震性評価 ブレース座屈長さへの影響の確認
ブレースメンバー	ブレースがある場合、その断面性能	当該天井の耐震性評価
段差部の下地	補強、縁切りの有無 下地の固定状況	当該天井の耐震性評価
天井周囲	クリアランスの有無	当該天井の耐震性評価
吊元	吊元の状況 RC・ﾃﾞｯｷｲﾝｻｰﾄ、鉄骨母屋、ぶどう棚鉄骨、折板等	吊元の健全性の評価
吊元の固定状況	引掛け式金物の有無	吊元の健全性の評価
天井内設置物	設備機器、点検足場、舞台設備他の有無と設置状況	天井下地との干渉の有無確認 落下防止対策の確認
天井周囲の部位	壁、柱等の構造	天井慣性力に対する耐力評価
間仕切り壁	構成（天井下、天井勝ち、パーティション等）	地震時の天井への影響、天井からの影響の確認

この調査項目は一般的な在来軽天工法吊天井の場合の例であり、当該天井の種別や状況、要求性能に応じて点検項目の増減を行い、調査を実施する必要がある。例えば天井ふところに外気導入を計画している場合などは、強風時の天井への風流入の影響や対策を確認する、等である。

なお、天井を点検すると、既往の地震によると思われる損傷（溶接部の破断、クリップ・ハンガーの滑り、損傷、天井ふところ内の他部位との干渉による吊ボルトの変形他）が見られたり、経年劣化による支持耐力の低下（点検通路のぐらつき・緩み、湿気・漏水等による天井材・下地材等の劣化等）、天井内残留物の放置（建設用具、点検用具の置き忘れ等）など、人命保護や機能維持上問題となる箇所が見つかる場合があるので、発注者に応急対策を含む早急な対策の実施を促すべきである。

以下に、早急な対策が必要な事例を示す。「5.2　隠れた被害の認識」も併せて参照されたい。

図 3.5.3　天井下地の腐蝕

図 3.5.4　天井吊元の母屋鉄骨の腐蝕

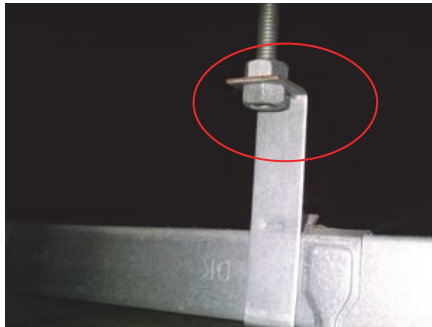



図 3.5.5　ボルトの緩み
（余長が確認できない）

図 3.5.6　ふところ内に存置された残材

図 3.5.7　木製の天井吊材接合部
（経年による縮みまたは
外れによる天井の垂下）

図 3.5.8　不適切な溶接と
外力の履歴による損傷

図 3.5.9　ブレースの不適切な設置例
（吊りボルト中腹に点付け溶接）

図 3.5.10　下地接合部の損傷

(3) 改修計画・工事における注意点

既存天井を改修する場合、人命確保の確実な実現とともに、目標とする機能維持の性能について関係者と合意形成の上、必要な措置を講じる。

①関係者との合意形成

まず、人命保護の確保の方針について十分な合意を得る必要がある。それから、必要に応じて機能維持の方針についての合意形成に入る。以下、機能維持の典型的な例として、天井の地震時の安全性、耐震性確保を検討する際の注意点について述べる。

天井の耐震改修の際に、発注者より「○G まで持つ天井とすること」という与条件が提示されるケースが多い。このような予条件はしばしば、「○G まで落ちない、壊れない天井」と認識されがちであるが「○G まで落下しない天井ではなく、○G まで機能維持でき、地震時はもとより地震の有無にかかわらず常に人命保護が実現されている天井として安全を確保する」という観点を共有することが重要であると思われる。したがって、発注者との改修方針を協議する場合、まず人命保護対策についての合意形成から始める必要がある。

進め方は 3.4.1 項の考え方と同じである。まず、天井材が無くても当該室や建物の目的、要求性能、機能を満足する場合は、天井撤去を検討しその採否の確認を行う（例：図 3.5.11）。次に軽量柔軟な天井材等、安全性評価法を満たす天井材への変更の可否を検討する。そのうえで、既存天井の形式を維持して改修を行おうとする場合には、既存天井材を生かしてフェイルセーフ機構を設置する等の検討、あるいは既存天井を撤去し人命保護が確実となる新たな天井にやり替える等（準構造形式を含む）を検討し、施設に見合った最適解について合意形成を図る。

図 3.5.11　中小事務所で吊天井を撤去する改修提案例

②機能維持のための改修の注意点

機能維持の観点で改修計画する際に、特に耐震上の性能差が生じやすいのが、天井ふところ内で天井下地を補強・改造する場合である。「接合部のみを補強する」といった改修方法でも、既存のままよりも損傷リスクは軽減できる場合が多いと思われるが、天井端部の周囲の部位への衝突による衝撃力の発生や、大規模な天井で端部の圧縮力（天井慣性力）の集中により下地材が面内座屈する等の状況下では、接合部補強の損傷防止効果も限定的となる。

また、野縁・野縁受け等の主材の肉厚が薄く低強度の部材（一般材・普及材等）の場合は特段の注意が必要である。実態として、これまで相当数の低強度部材が市場に出回っている。これらの部材で天井を構成した場合、水平力に対する面剛性は著しく低下する（例えばJIS材と低強度材（通称一般材）の比較で天井面剛性が約40%低下[3)]するほか、ビス接合部耐力も30%～40%低下[4)]するという実験結果等が報告されている)。このような低強度部材に天井下地補強を実施しても、例えばJIS A6517材等に対する天井下地補強と同等の耐震性能は期待できない。市販の補強金物や補強ノウハウはJIS A6517材に適用した場合の実験や検討がなされたものがほとんどであり、これらを低強度の野縁や野縁受けに適用した場合、期待した効果が発揮されない。特に接触力に依存した摩擦接合で補強金物を低強度部材に取り付けた場合は、設置時点でがたつきやゆるみが生じる場合も多く、補強方法の選定を慎重に行う必要がある。

地震力に対する損傷制御のためにブレース等の耐震要素を設置する場合、3.2.3項で述べたとおり、野縁・野縁受等の主材と接合部耐力など下地全体のバランスが取れていないとブレースは有効に機能しない。既存設備等が天井ふところ内に存在する天井改修の場合は、理想的な位置・方法で補強が実施できないケースも多いため、現地を確認しながら補

強方針を緻密に計画する必要がある。その際、ブレースを不用意に天井面に対し偏在して設置した場合は、地震時に天井面に回転や捻れが生じ、かえって天井損傷を誘発する場合があることを忘れてはならない。このような場合、ノの字やレの字、ハの字、逆ハの字のブレースを使用して全体のバランスを取ることも想定されるため、あらかじめこれらのブレース構成別に負担可能天井面積を把握しておく必要がある。試験施工ができるような状況であれば、一部の天井を、想定した方針で本施工前に試験施工し、関係者で課題を共有し解決を図る工程は非常に有効である場合が多い

③折板などの屋根が吊元の場合

折板屋根等の仕上部材から直接吊っている天井は、常時風などの外乱による振動や変位を吊元仕上部材から受け続けることになる。また地震時には、構造材ではない吊元仕上部材に吊ボルトから地震時の慣性力などが直接伝達される。接合部のディテールを含め、吊元仕上部材に十分な耐力が確保できることを判定するのは困難であるため、原則として折板などから天井を直接吊ることを避けるべきである。この場合、確実な人命保護が達成できない場合は既存天井を撤去する。また、母屋鉄骨やぶどう棚などの別部材を準構造材として設置し、そこから人命保護の確保された天井を吊ることが有効である。ただし、改修は鉄骨工事を含む大規模な工事が必要となるため、事前に工事工程や仮設計画を含めた総合的な検討が必要となる。

④使用しながら改修する場合

既存天井の改修を促進するうえで克服すべき課題が、施設や室を使用しながら改修する場合である。発注者からは施設稼動しながら天井の改修を図りたい、という要求がなされる場合が多い。例えば折板から吊られた天井を改修する場合は、既存天井を取り壊し、天井内設備を解体し、母屋鉄骨やぶどう棚を既存躯体に取付け、落下防止された設備、人命保護の確実な天井に改修する、といった長期間の事業停止や多額の費用負担が必要となる。その場合、使いながら改修することを優先するあまり、3.2.3 項に記したような注意点に対し十分な措置を講じない工法が（やらないよりまし、というような観点で）採用されるケースが散見される。例えば耐震性を付与しようとする改修の場合でも、天井周囲にクリアランスを設けず、周囲の壁などの耐力も評価せず、天井の面内座屈検討も行わず、接合部のみ補強する、といった例である。このような場合、地震時に天井や周囲の壁も含めて甚大な損傷が生じる懸念を残しており、天井の改修工事が本来の機能維持目標を達成しない場合も想定されるため、特に慎重な検討を要する。

このような状況に対し、様々なふところ寸法、吊元状況や下地の耐力、天井の重量に対し、ある程度の冗長性や汎用性をもって、施設を使用しながら改修できる工法の開発が急務であると考えられる。4.2 で紹介するケーブルやグリッド材による下から支える工法な

どは、こういった場合も想定して開発された工法である。

⑤ホールや劇場等の天井改修

次に、劇場その他それに類する施設の天井を改修する場合、非常に大きな質量の天井材を複雑な形状で構成しなければならない場合が多い。既存天井に落下の懸念がある場合は、準構造形式（3.1.3 項参照）へのやり替えや、フェイルセーフ機構（3.1.2 項参照）の付加等の対策が求められる。個別性の高い検討が必要なため、建築、構造、設備、施工等の専門技術者らにより総合的に計画を進めることが望ましい。質量の大きな音響天井を準構造で構築する場合は、特に音響技術者が構造技術者や関連技術者と協働し知見を積み重ねていくことが必要である。

ネット張りで天井の落下防止を図る場合、ネット自身の短期許容応力の特定や接合部の構工法、想定荷重に対するネット構面全体の応力分布の把握、水平軸力で鉛直荷重を支える際のスラスト荷重の評価、既存構造体への緊結方法など、定式化が困難な課題が多く残されている。安易に「ネット張り」という見た目の安心感に依存せず、確実な落下防止性能を満足するための総合的な検討が求められる。この件は 3.1.2 項に詳述されているので参照されたい。

⑥地震時以外の天井落下防止対策

耐震改修以外の天井脱落防止改修の注意点について述べる。

図 3.5.3～10 に示した通り、特に当該室の室内湿度が高い場合（プール、浴場、食品工場等）や化学薬品が使用される場合等は、天井内で天井下地材の腐蝕が生じやすい。このような状況の室については、天井内の調査を早急に実施して腐食・損傷の程度を確認し、緊急度に応じて応急対策の実施を建物所有者に促す。恒久的な改修計画については 3.2.4 項の注意点を参照し、適切な対策、材料の選定を行い、改修方針を決めることが重要である。

また、常時の外力や振動を繰り返し受ける環境下の天井については特段の注意が必要である。一般的な天井下地は 0.5㎜～2.3㎜ といった薄板が使用されており、繰り返し加力による疲労が生じやすい。また、接合ビスやボルトには適切な緩み止め対策を施さないと接合部の崩壊を招く。このような天井に対しては、各接合部の外力に対する耐力、信頼性を慎重に評価し、適切に脱落防止対策を実施することが必要となる。接合部に接着剤などの有機化合物を併用する工法を使用した場合は、耐用年限を適切に設定し、定期的に維持管理を実施する必要がある。ただし、天井内での目視による点検の確実な実施は困難であるため、万一の落下に備え、ここでもフェイルセーフ機構の併用が有効である。

参考文献

1) 国土交通省 総合政策局 建設統計室： 「建築物ストック統計（平成 24 年 1 月 1 日現在）の公表」: 2012 年 10 月 3 日

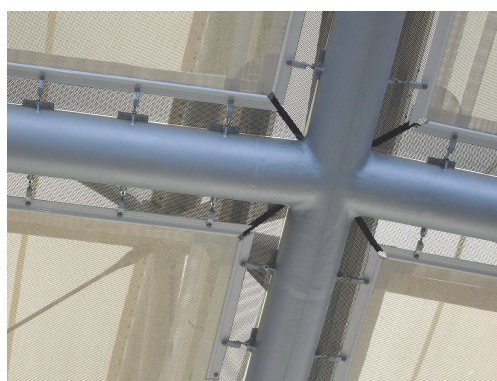
2) 財団法人経済調査会 :「軽鉄天井下地価格の長期時系列決定要因分析」: 第二調査部　建築調査室　塩海　亮 : 74 建築コスト研究 2010 SPRING

3) 荒井 智一，星川 努，小林 俊夫，九野 修司，大迫 勝彦，吉田 宏一，渡辺 恵介， 荻原 健二 : 金属パネル天井の耐震性に関する研究（その３）天井面内剛性試験 : 日本建築学会大会学術講演梗概集（九州） 2007年 8 月

4) 櫻庭 記彦，金子 美香，鈴木 健司，内本 英雄，田中 栄次： 既存天井の後付け改修用「グリッドサポート構法」の開発 : 清水建設技術研究所報　2013

豊かな内部空間を演出する天井１

シースルーの麗人：ベルリンオリンピック競技場(Olympiastadion in Berlin)

1936年ベルリンオリンピックの為にWerner Marchによって設計されたベルリンオリンピックスタジアム。これに､2006年のサッカーワールドカップのメインスタジアムを目指して76基の放射方向片持ちトラス梁で支持された屋根が増築された。屋根構造の仕上げ材は外膜と内膜があり、外膜はPTFEコーティングの防汚性ガラス繊維膜で、サブアーチで鞍型の張力面が保たれている。天井膜は目の粗いPTFEコーティングガラス繊維のメッシュ膜で、構造部材と照明、音響設備やキャットウォーク等の臓物の目隠しとして平面状に張られている。トラス部材に直接指示されたメッシュ状の膜天井の適度なシースルー感は、内部空間を実にすっきりと見せている。夜間は天井面全体が光天井状態となる。

参考：FIFAワールドカップ2006ドイツ大会開催スタジアムの視察報告，鉄鋼技術，2006.5.

第 4 章　事例紹介

本章では、天井落下に対応する各工法の事例と特徴、長所、採用する際の注意事項等を紹介する。より安全安心なだけでなく、さらに豊かな空間を実現するためには、これらの工法を実プロジェクトで積極的に採用し、更なる技術開発を推進していくことが不可欠である。

1. 工法適用にあたって

実プロジェクト（新築、改修、復旧を問わず）への採用においては、工法毎の特性を理解することが重要である。工法特有の注意事項を軽視しては、本来の性能を発揮出来ないばかりか、思わぬ危険性を見逃す可能性もある。それらを個別プロジェクトの様々な与条件と整合させた上で、積極的に採用することが必要である。

採用にあたっては、常に人命保護と機能維持の違いを意識した適切な工法の選択・組合せが重要であり、実現に向けて関係者間の合意の下で進めて頂きたい。

2. 技術開発

2011 年東日本大震災以降、天井落下対策に対する要求（発注者要求、新規技術開発等）が高まっている。技術開発については、設計者、ゼネコン、材料製作業者等で個々の開発が進められている。しかし、進行具合やバリエーションが、求められている天井（新規、既存を問わず）の絶対量に対して充分とはとても言えない状況である。より積極的な推進と、それをバックアップする行政、学術研究者等の側の取組が不可欠である。

技術開発に於いても、本ガイドライン中の情報（仕組、研究、事例等）は有用であり、大いに利用して頂きたい。尚、**当該技術が人命保護と機能維持のどちら（或いは両方を満たす場合も含めて）を目指すものかをよく認識した上で利用することが重要である。**

4.1　人命保護工法の事例

人命保護は、直天井化、軽量柔軟化、フェイルセーフ、準構造などの工法により実現することができる。

以下に、人命保護を実現する 4 種類の工法（直天井化、軽量柔軟化、フェイルセーフ、準構造）の事例と特徴、長所、採用する際の注意事項等を紹介する。

前章までに取上げた天井落下に対する対策の内、まず最初に取り組むべき「人命保護」を実現する 4 種類の工法（直天井化、軽量柔軟化、フェイルセーフ、準構造）の事例と特徴、留意すべき項目等を紹介する。人命保護を最優先とする考えの主旨を理解した上で、活用されたい。

4.1.1　直天井化の事例

人命保護を実現する工法として、「直天井化」の事例と特徴、長所、採用する際の注意事項等を紹介する。

天井の落下対策として最もシンプルな発想は、言うまでもなく「天井を張らない」ことである。本項では、地震の被災施設の復旧例、及び既に様々な用途、空間に採用されている「直天井化」の事例と特徴、長所、採用する際の注意事項等を紹介する。尚、直天井化をさらに進め、建築・構造・設備を一体として計画した「構造一体化」天井も対象としている。

1. 直天井化の事例（被災施設の復旧・改修例）

直天井化について、地震の被災施設の復旧・改修事例を以下に示す。

図 4.1.1.1　茨城空港【A】（被災時）[1)]

図 4.1.1.2　同左（復旧後）[2)]

図 4.1.1.3　某公共プール【B】（被災後）

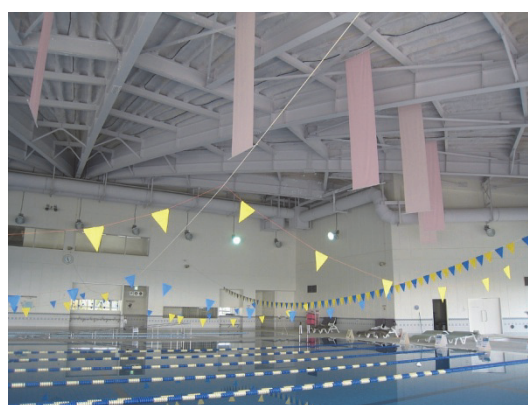



図 4.1.1.4　同左（復旧後）

茨城空港【A】は 2011 年東日本大震災での天井の落下シーンがテレビで報道され、天井落下の恐怖を広く周知する結果となった。原因のひとつとして、天井内の設備が干渉し、正規の位置に吊りボルトやブレースが配置出来なかったことも指摘されている。被災後、直天井の新たなデザインとなって再生した（図 4.1.1.1～2）。

事例【B】のプールは 2005 年宮城県沖地震で被災し、大きく崩落した。復旧に当たっては、ここでも直天井が採用された（図 4.1.1.3～4）。

2. 直天井化、構造一体化の事例（参考事例）

被災からの復旧例以外にも、以前から直天井化や建築・構造・設備を一体化したシステムは提案・実施されている。これらの本来の目的は天井落下の防止でない場合も多いが、天井を構成する要素と納まりについては参考とすべきものが多数含まれているので、今後の安全対策の参考として紹介する。

図 4.1.1.5　参考事例【1】（事務所・1）

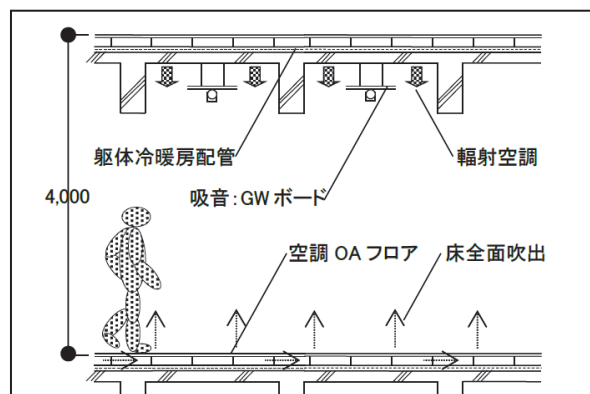



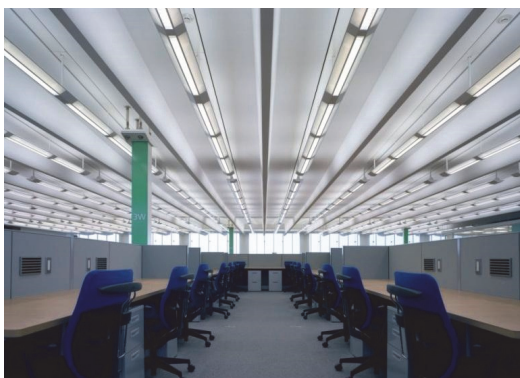
図 4.1.1.6　同左・模式断面図

「構造一体化」の事例

図 4.1.1.7　参考事例【2】（事務所・2）

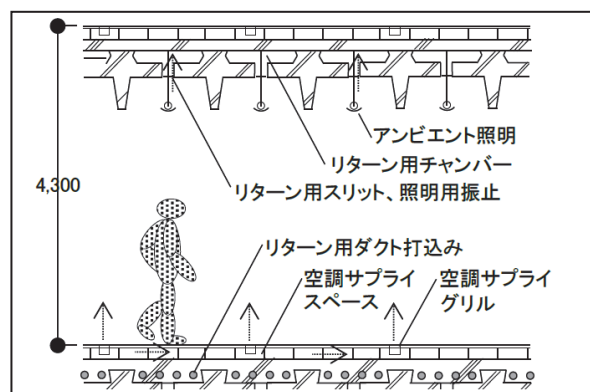



図 4.1.1.9　参考事例【3】（事務所・3）

図 4.1.1.10　同左・模式断面図

アンビエント照明
リターン用チャンバー
4,300
リターン用スリット、照明用振止
リターン用ダクト打込み
空調サプライスペース
空調サプライグリル

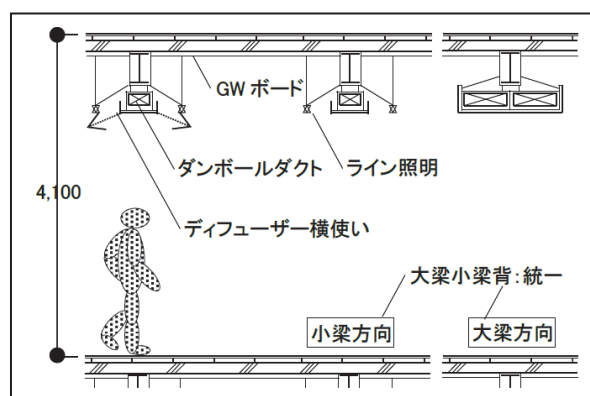



図 4.1.1.8　同左・模式断面図

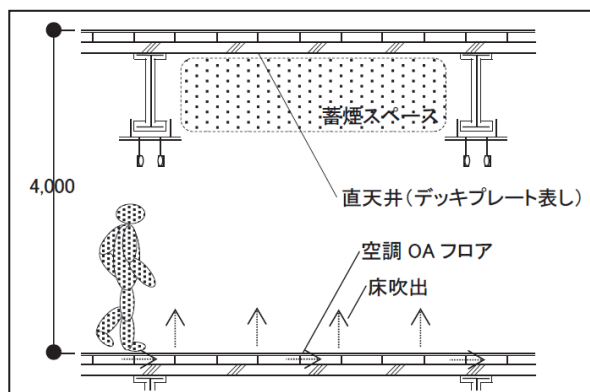



図 4.1.1.11　参考事例【4】（研究所）　　　図 4.1.1.12　同左・模式断面図

参考事例【1】～【4】は事務室空間での事例である。ここでは空調システム等に工夫がなされ、躯体蓄熱や床吹き出し等が採用されている。一方、大梁と小梁の背を統一し、その下にダンボールダクトを展開するシステムを採用した事例もみられる。このように工夫次第で、他用途を含めた適用の可能性は高い（図 4.1.1.5～12）。

一方、2011 年東日本大震災で落下被害が多かった大規模商業施設でも以前から意匠性を意識した直天井は多数作られてきており、落下被害防止を目的とした普及の可能性は高い（参考事例【5】、【6】：図 4.1.1.13～16）。

図 4.1.1.13　参考事例【5】（商業施設・1）　　　図 4.1.1.14　同左

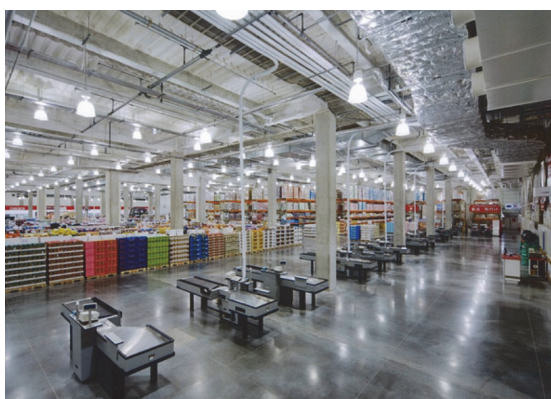
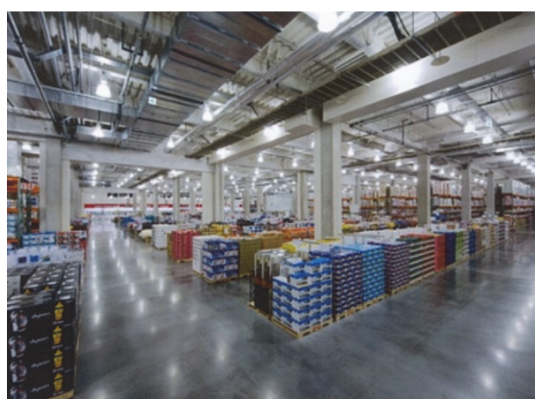



図 4.1.1.15　参考事例【6】（商業施設・2）　　　図 4.1.1.16　同左

さらに、生産施設でも参考となる事例がみられる。参考事例【7】（図 4.1.1.17〜18）はCNC 旋盤工場に層流を利用した空調・換気システムを採用し、直天井を実現している。

図 4.1.1.17　参考事例【7】（生産施設）

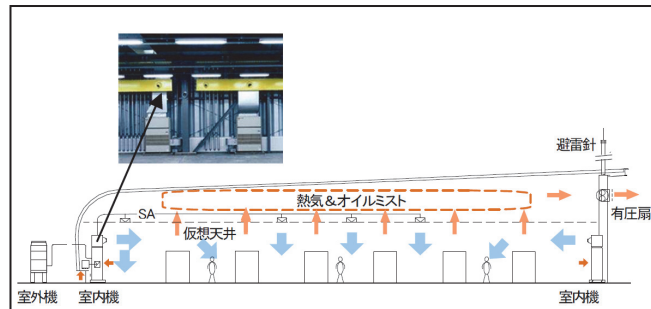



図 4.1.1.18　同左・模式断面図

直天井化の例について、被災前後の仕様、機能上の変化、及び採用する上での注意事項等を表 4.1.1.1 に示す。**実際のプロジェクトに採用する際は、個別の与条件を踏まえた詳細な検討が必要**であるが、基本事項を纏めているので、参考にして頂きたい。

尚、注意事項として音響、空調性能等の一部劣化等を上げているがあくまで一般論であり、個々のプロジェクトでは素材、形態、納まり等の工夫により用途毎に必要な性能、機能を実現している。又、デザインとしても夫々に個性があり、新規性、先進性を感じさせるものも多い。

表 4.1.1.1　直天井化の仕様と機能変化

用途	被災前仕様	被災後仕様※	長所	注意事項
■被災・復旧例				
茨城空港【A】3) ・ロビー	・石膏ボード t 9.5 ＋岩綿吸音板 t 15 ・3m×11mに分割	・屋根折板表し ＋塗装仕上げ	・天井としての落下物が無い	・設備，サイン等の落下防止 ・音響、空調性能等の一部低下
某公共プール【B】 ・プール	・ｹｲ酸ｶﾙｼｳﾑ板 t 8 ＋耐湿岩綿吸音板 t 12	・屋根下地表し ＋塗装仕上げ	同上	同上 ・躯体、屋根下地、設備等の結露、防錆対策
■参考事例		※参考事例では被災後仕様ではなく、新築時の仕様、採用技術等を示す		
参考事例【1】 事務所 1・事務室	—	・RC ｽﾗﾌﾞ、梁表し ・輻射空調 ・床全面吹出空調	・天井としての落下 物が無い	・設備、吊り物等の落下防止 ・音響、空調性能等の一部低下
参考事例【2】 事務所 2・事務室	—	・PC ｽﾗﾌﾞ、梁表し ・構造一体化 ・PC ﾘﾀｰﾝﾁｬﾝﾊﾞｰ ・床吹出空調	同上	同上
参考事例【3】 事務所 3・事務室	—	・RC ｽﾗﾌﾞ ＋GW ﾎﾞｰﾄﾞ直張り ・大・小梁背統一 ・ﾀﾞﾝﾎﾞｰﾙﾀﾞｸﾄ	同上	同上
参考事例【4】 研究所・事務室	—	・ﾃﾞｯｷｽﾗﾌﾞ表し ・耐火被覆、ﾀﾞｸﾄ、ｹｰﾌﾞﾙﾗｯｸ表し ・床吹出ｱﾝﾋﾞｴﾝﾄ空調＋ﾀｽｸ空調	同上 ・梁内空間の畜煙	同上
参考事例【5】 商業施設 1・売場	—	・ﾃﾞｯｷｽﾗﾌﾞ表し ・梁、設備等表し ・化粧ﾌﾚｰﾑ	・天井としての落下 物が無い	・設備、サイン等の落下防止 ・音響、空調性能等の一部低下
参考事例【6】 商業施設 2・売場	—	・ﾃﾞｯｷｽﾗﾌﾞ表し ・梁、設備等表し	同上	同上
参考事例【7】 生産施設・ CNC 旋盤工場	—	・屋根折板表し ・梁、設備等表し ・層流空調	同上	・設備、吊り物等の落下防止 ・ｵｲﾙﾐｽﾄによる汚れ

参考文献、参照画像等

1）NHK・TV ニュース

2)「天井の安全学」日経アーキテクチュア 2011.6-25、P28

3）大場　康史、川口　健一：東北地方太平洋沖地震による茨城空港ターミナルビル内天井落下に関する速報（第 2 版）

4.1.2　軽量柔軟化の事例

人命保護を実現する工法として、「軽量柔軟化」の事例と特徴、長所、採用する際の注意事項等を紹介する。

1. 安全性評価と軽量柔軟化

前段の「3.1.1　安全性評価法」で示しているように、軽量或いは柔軟な天井材の採用は、人命保護には極めて有効である。天井に要求される性能を絞り込み、可能な限りの軽量化・柔軟化を図って頂きたい。**高さによって使える材料が異なり、天井高が低い場合は人命保護上は天井材質の選択の範囲はある程度広くなる。**

2011 年東日本大震災では、様々な用途で多用されている在来工法の岩綿吸音板（捨て張りあり）天井の被災例が多数みられた。これらは捨て張りなしの岩綿吸音板に変更するだけでも、軽量柔軟化が図られ人命保護には有効である。更に、下地の落下対策としてフェイルセーフ工法等を加えることが望ましい。

又、在来工法による直張りの他、グリッドタイプのシステム天井の採用や更新も有効であり、更に地震時の機能維持に注力する場合は下地の耐震化を併用することになる。

2.　軽量柔軟化の事例（被災施設の復旧・改修例）

軽量柔軟化について、地震の被災施設の復旧・改修例を以下に示す。

事例【C】のプールは 2011 年東日本大震災で被災し、ボード天井から軽量柔軟化（膜天井）した事例であるが、天井と同時に空調ダクトが変更されていることが分かる（図 4.1.2.1～2)。

釧路空港【D】は 2003 年の十勝沖地震を受け出発ロビーの天井が落下した。復旧には膜天井が採用され、膜材の曲面を活かした軽快な仕上がりとなっている（図 4.1.2.3～5)。

静岡県立水泳場【E】は 2009 年の静岡沖地震で、天窓に取り付けられたアルミルーバが脱落する被害が発生した。更に地震とは別に屋根からの漏水が原因で、グラスウールボードの落下も発生した。ここでは、防炎膜による可動式の膜天井による復旧が行われた（図 4.1.2.6、8)。

図 4.1.2.1　某公共プール【C】（被災後）

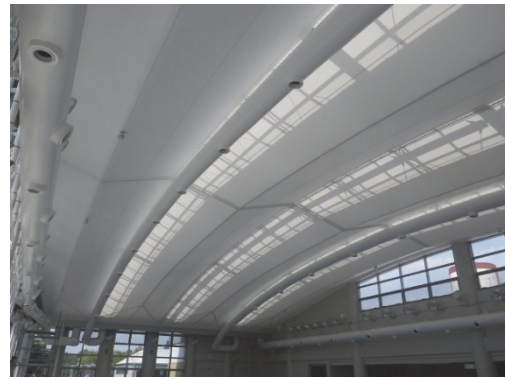



図 4.1.2.2　同左（復旧後）

図 4.1.2.3　釧路空港【D】（被災後）

図 4.1.2.4　同左（復旧後）

図 4.1.2.5　同上（復旧後・天井内）

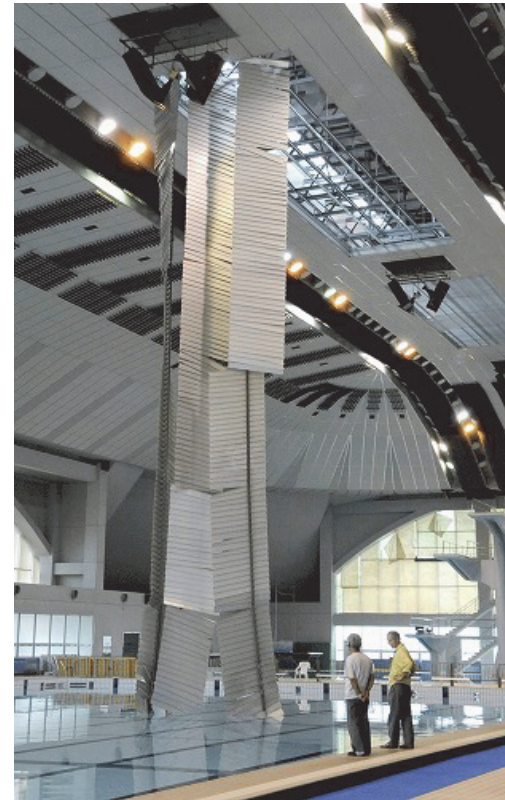



図 4.1.2.6　静岡県立水泳場【E】（被災後）

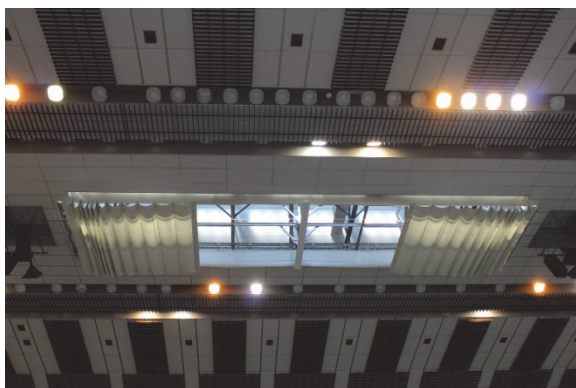



図 4.1.2.7　静岡県立水泳場【E】（復旧後）

図 4.1.2.8　同左（復旧後・天井内）

3. 軽量柔軟化の事例（参考事例）

被災からの復旧例以外にも、参考となる軽量柔軟化の事例は様々の用途でみられる。まず、一方向張力工法の膜天井を採用した事務所の執務空間（参考事例【8】図 4.1.2.9～11）である。一方向だけにテンションを与え、直交方向は膜材同士を若干重ねるのみの単純な納まりから、伸びやかで光の効果を活かした天井を実現している。

参考事例【9】は公立の文化施設内の図書館で、自由懸垂工法による膜天井の事例である（図 4.1.2.12）。

図 4.1.2.9　参考事例【8】（膜天井・1）

図 4.1.2.10　同左

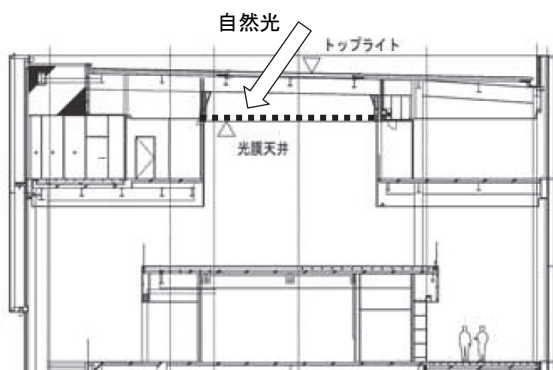



図 4.1.2.11　同上・断面図

図 4.1.2.12　参考事例【9】（膜天井・2）

図 4.1.2.13　参考事例【10】（GW ボード）

図 4.1.2.14　同左

一方、参考事例【10】はドーム球場の天井としてグラスウールボード（2.4 kg/㎡、 t 50）をワイヤーで吊り下げた事例である。すのこ状と縦ルーバ状に、或いはＸ方向とＹ方向に、又構造体の上弦材面と下弦材面に張り分けることで、多彩な表情を見せている（図 4.1.2.13～14）。

グラスウールボードの質量は体積：㎥（立方メートル）当たりで表示することが多いが、本報告書では他の天井材との比較を容易にする為、面積：㎡（平方メートル）当たりで表示することとした（例：48 kg/㎥、 t 50 の場合　⇒　2.4 kg/㎡）。

軽量柔軟化の事例について、被災前後の仕様、機能上の変化、及び採用する上での注意事項等を表 4.1.2.1 に示す。**実際のプロジェクトに採用する際は、個別の与条件を踏まえた詳細な検討が必要**であるが、基本事項を纏めているので、参考にして頂きたい。

尚、注意事項として音響、空調性能等の一部劣化等を上げているがあくまで一般論であり、個々のプロジェクトでは素材、形態、納まり等の工夫により用途毎に必要な性能、機能を実現している。又、デザインとしても夫々に個性があり、新規性、先進性を感じさせるものも多い。

表 4.1.2.1　軽量柔軟化の仕様と機能変化

用途	被災前仕様	被災後仕様※	長所	注意事項
■被災・復旧例				
某公共プール 【C】 ・プール	在来ﾎﾞｰﾄﾞ天井 ・ｹｲ軽板ｔ8 ＋ﾌﾟｰﾙ用ﾛｯｸｳｰﾙ 吸音板ｔ12	膜天井 ・A 種膜 ・全周張力工法	・ｼﾝﾌﾟﾙなﾃﾞｻﾞｲﾝ ・ﾄｯﾌﾟﾗｲﾄを活かした明るさ	・躯体、屋根下地、設備等の結露、防錆対策 ・施工性（大面積）
釧路空港【D】 ・ロビー	在来ﾎﾞｰﾄﾞ天井 ・石膏ﾎﾞｰﾄﾞｔ9.5 ＋岩綿吸音板ｔ12	膜天井 ・A 種膜 ・自由懸垂工法	・変形追従性 ・軽快なデザイン	・設備、サイン等の落下防止 ・施工性（高天井用仮設）
静岡県立 水泳場 【E】 ・プール	・ｱﾙﾐﾙｰﾊﾞ 〈震災で落下〉 ・ＧＷﾎﾞｰﾄﾞ 〈漏水で落下〉	可動式膜天井 ・防炎膜	・軽量・柔軟化 ・開閉可能	・躯体、屋根下地、設備等の結露、防錆対策 ・断熱の密閉性
■参考事例		※参考事例では被災後仕様ではなく、新築時の仕様、採用技術等を示す		
参考事例【8】 ・事務室	―	膜天井 ・内装用不燃膜① ・一方向張力工法	・軽快なﾃﾞｻﾞｲﾝ ・明るさ ・超軽量	・設備方式、取合いの調整 ・音響性能等の一部低下 ・反力が発生 ・ｼﾜが発生し易い
参考事例【9】 図書館 ・開架閲覧室	―	膜天井 ・内装用不燃膜② ・自由懸垂工法	・軽快なﾃﾞｻﾞｲﾝ ・超軽量 ・施工が容易	・設備方式、取合いの調整 ・音響性能等の一部低下
参考事例【11】 興行場 ・ホール	―	膜天井 ・A 種膜 ・全周張力工法	・造形的デザイン ・高反射材	・設備方式、取合いの調整 ・支持、形状ﾌﾚｰﾑが必要
参考事例【10】 大型ドーム ・アリーナ	―	GWﾎﾞｰﾄﾞ天井 ・GWﾎﾞｰﾄﾞ 2.4kgｔ50 ＋ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・ﾜｲﾔｰ吊り工法	・軽量で吊り工法にて互いに独立しているため地震の揺れに追随する	・ﾜｲﾔｰ張力の確認（経年） ・打球衝突時の安全性 ・解放使用時の風による揺れ
参考事例【23】 大型ドーム ・アリーナ	―	GWﾎﾞｰﾄﾞ天井 ・GWﾎﾞｰﾄﾞ 2.4kgｔ50 ＋ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・立体枠工法	・吸音面積を大きく確保し易い ・形状の自由度が高い	・下地、設備等の落下防止
参考事例【25】 大型ドーム ・アリーナ	―	GWﾎﾞｰﾄﾞ天井 ・GWﾎﾞｰﾄﾞ 2.9kgｔ30 ＋ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・直張り工法	・吸音面積を大きく確保し易い	・下地、設備等の落下防止 ・打球衝突時の安全性

注：グラスウールボードの質量は厚さを考慮し、面積：㎡当たりで表示

4. 膜天井の素材と工法

軽量柔軟化の代表格である膜天井の素材と工法の特徴等を以下に示す。

(1) 代表的な膜材を紹介する（表 4.1.2.2）。本報告書では仮に不燃膜と防炎膜に、さらに夫々を厚膜タイプと薄膜タイプに分類している。

表 4.1.2.2　膜天井の素材と特徴

種別・仕様	防火	膜重量 厚さ （目安）	長所	注意事項	デザイン性	適用・用途	事例
不燃膜							
厚膜タイプ							
・ガラス繊維＋ ・ﾌｯ素樹脂ｺｰﾄ （A 種膜材料）	不燃	1.0 kg/㎡ 0.6 ㎜	・耐久性 ・透光性 ・通気性の選択可能	・柔軟性に欠ける ・コストが高い	・透光性による演出	屋外 （屋内）	【17】 【18】
・ガラス繊維＋ ・塩化ﾋﾞﾆﾙ樹脂ｺｰﾄ （B 種膜材料）	不燃・防炎	0.78～0.9 kg/㎡ 0.5 ㎜	・耐久性 ・透光性	・柔軟性に欠ける	・着色可能 ・透光性による演出	屋外 （屋内）	
薄膜タイプ							
・ガラス繊維＋ ・ｱｸﾘﾙ樹脂ｺｰﾄ (内装用不燃膜①)	不燃	0.27～0.35 kg/㎡ 0.24～0.4 ㎜	・超軽量 ・比較的安価	・柔軟性に欠ける	・透光性に優れる ・印刷可	屋内	【8】
・ガラス繊維＋ ・塩化ﾋﾞﾆﾙ樹脂ｺｰﾄ (内装用不燃膜②)	不燃	0.35～0.58 kg/㎡ 0.36～0.41 ㎜	・超軽量 ・比較的安価	・柔軟性に欠ける	・透光性に優れる ・印刷可	屋内 （屋外）	【D】 【9】
・ガラス繊維＋ ・ﾌｯ素樹脂ﾞｺｰﾄ	不燃	0.45～0.49 kg/㎡ 0.29～0.41 ㎜	・耐候性 ・超軽量	・柔軟性に欠ける	・透光性に優れる	屋内 （屋外）	【11】 【12】 【14】 【16】 【18】
・ガラス繊維＋ ・ｼﾘｺﾝ樹脂ｺｰﾄ	不燃	0.26 kg/㎡	・超軽量	・柔軟性に欠ける	・透光性に優れる	屋内	
・ガラス繊維＋ ・塩化ﾋﾞﾆﾙﾌｨﾙﾑ	不燃	0.43 kg/㎡ 0.3 ㎜	・非常に薄い ・柔軟性 ・耐候性が良い		・着色可能	屋内	
防炎膜							
厚膜タイプ							
・合成繊維＋ ・塩化ビニル樹脂 （C 種膜、含類似）	防炎	0.6～0.9 kg/㎡ 0.54～0.8 ㎜	・柔軟性が高い ・コスト	・防火性能 ・耐久性	・着色可能 ・吸音効果が高い	屋外 （屋内）	【C】
・ﾎﾟﾘｴｽﾃﾙ繊維＋ ・塩化ﾋﾞﾆﾙ樹脂ｺｰﾄ （ﾒｯｼｭ膜材料）	防炎	0.6 kg/㎡ 1.1 ㎜	・柔軟性が高い ・コスト ・ﾌｪｲﾙｾｰﾌ目的可	・防火性能 ・通気性（3 割程度） ・耐久性	・着色可能 ・視認性	屋外 （屋内）	
薄膜タイプ							
・塩化ﾋﾞﾆﾙﾌｨﾙﾑ	防炎	0.2～0.4 kg/㎡ 0.18～0.3 ㎜	・拡散率が高く照明が透けて見えにくい ・超軽量 ・自己消化性 ・安価	・安価	・延びる～3 次曲面可能	屋内 （屋外） ・大型光膜 ・室内装飾 ・欧米では内装用膜材の主流	【12】 【13】 【15】

天井材に適した屋内向けの薄膜タイプは近年開発が活発であり、より軽量で柔軟な素材が製品化されつつあり、不燃膜も増えている。目的に応じて付加価値をつけた製品もある。光膜天井用に光を様々に演出したり、プール用の撥水・防カビ仕様、柔軟な形状が可能な膜等、幅広い活用が可能である。

膜材には不燃膜と防炎膜があり、内装制限に合わせて使い分ける必要があるが、不燃を求められることが膜天井の採用のネックになる場合も多い。「5.5　天井落下防止と火災安全性の両立について」でふれているように、不燃の制約が限定化されれば膜天井の普及に繋がる可能性がある。又、現状でも膜の使い方（工法、範囲等）次第では、防炎膜を有効に使っている事例も見られる。直天井扱いとし、膜は天井材ではなくカーテンに類似する造作材としている例もある。計画段階で膜の使い方を工夫し申請協議を適正に進める中で、膜天井を積極的に採用することで安全安心な天井の事例が増えることと考えられる。

(2) 膜天井の工法を全体工法と端部の納め方である詳細工法に分けて紹介する。全体工法の特徴等を表 4.1.2.3 に、力学的なイメージと参考事例を図 4.1.2.15 に示す。

一方、端部工法は図 4.1.2.16 で、模式図等で示している。

表 4.1.2.3　膜天井の全体工法と適用

工法・概要	端部工法	長所	注意事項	デザイン性	事例
全周張力工法					
・ﾌﾚｰﾑを組み、全ての外周部で膜を定着	・ﾗｯｷﾝｸﾞ ・金属枠固定 ・嵌合工法	・大規模で均質な形態（平面、曲面共） ・設備取合いが容易	・下地ﾌﾚｰﾑが重い ・躯体反力が大きい	・形状の自由度が高い ・光の演出が多彩	【C】 【11】 【12】
同上・パネル工法					
・小単位のフレームに膜を定着し、複数を組合せて	・金属枠固定 ・嵌合工法	・小単位の組合せで自由な形態が可能 ・軽量 ・躯体反力が小さい	・下地が細分化しており、脱落防止に注意	・金属パネルの代替可（透光率小の場合） ・	【13】 【14】
一方向張力工法					
・一方向のみで膜を定着	・ﾗｯｷﾝｸﾞ ・嵌合工法	・大規模で均質な形態 ・変形追従性が高い ・納まりがシンプル ・施工が早い	・躯体反力が大きい	・"膜"らしい形状 ・光の演出が多彩	【8】 【9】 【15】 【16】
サスペンション工法					
・外周にﾎﾟｲﾝﾄで金物を付け、張力を与える	・ﾜｲﾔｰ＋ﾌｯｸ ・ﾛｰﾌﾟ＋ﾌｯｸ	・変形追従性が高い ・納まりがシンプル ・施工が早い	・躯体反力が大きい	・ｻｽﾍﾟﾝｼｮﾝ膜らしい軽快さ ・光の演出が多彩	【17】 【18】
自由懸垂工法					
・両端 2 辺のみを定着し、張力を掛けない	・ﾊﾟｲﾌﾟ吊り ・嵌合工法 ・ﾌｧｽﾅｰ工法	・大規模が可能 ・変形追従性が極めて高い ・納まりがシンプル ・躯体反力が小さい	・しわ調整が必要	・"膜"らしい形状 ・光の演出が多彩	【D】 【E】 【19】 【20】 【21】内膜
空気膜工法					
・閉じた膜間、又は室内の気圧を上げて形態を保持	・ﾗｯｷﾝｸﾞ ・嵌合工法	・大規模で均質な形態 ・工法上、落下の懸念が無い（又はゆっくりしぼむので避難可能）	・大規模な加圧装置 ・ﾗﾝﾆﾝｸﾞｺｽﾄが高い	・工法そのものが内外の形態に表れる	【21】外膜 【22】

注：工法に統一された一般名が無い為、本報告書限りの仮の名称とした

空気膜工法は構造体そのものであり、構造システム＝（イコール）外観デザインとなっている。一方、その構造システムが内観にも表れ、特徴的な天井デザインを実現する場合があることから、天井工法の分類にあえて加えることとした。

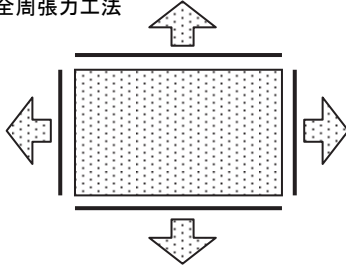
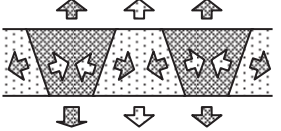
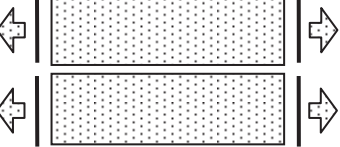
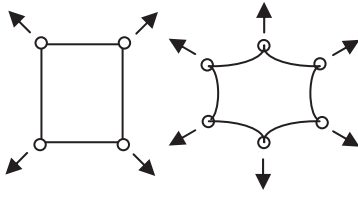
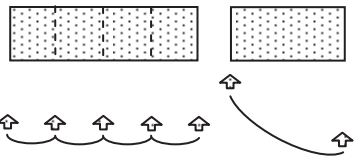
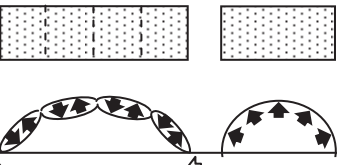



図 4.1.2.15　膜天井　全体工法のイメージと事例（1／2）

注：工法に統一された一般名が無い為、本報告書限りの仮の名称とした

図 4.1.2.15　膜天井　全体工法のイメージと事例（2／2）

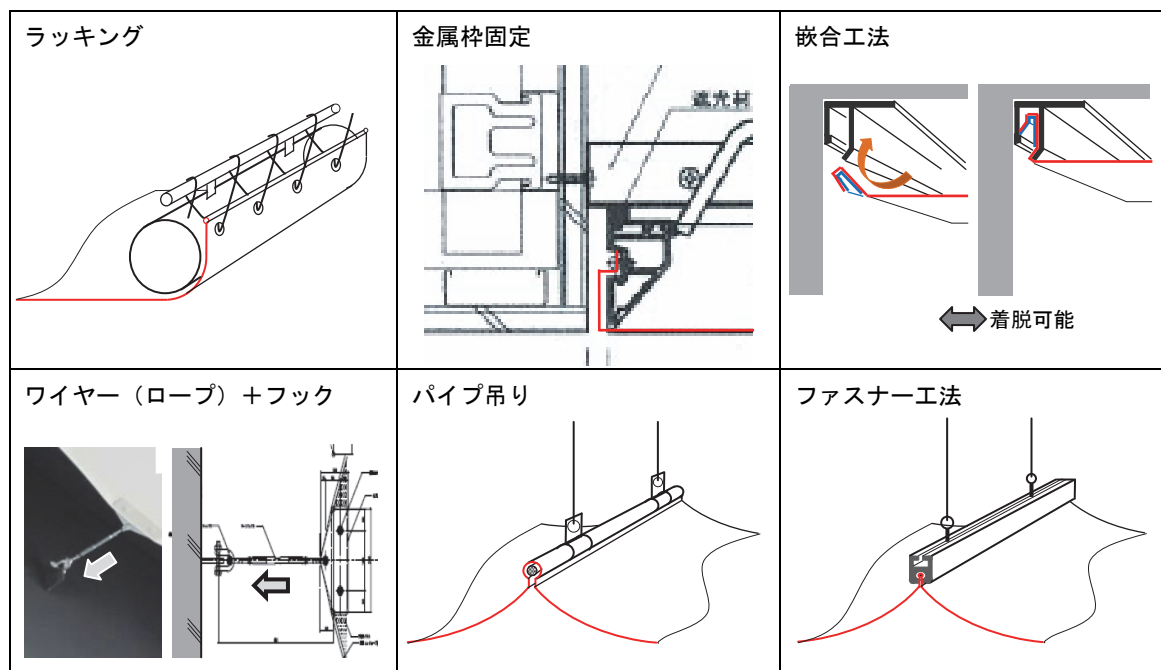



図 4.1.2.16　膜の端部工法

工法も屋内に適した比較的簡単な工法が増え、軽量化や大型化に加え、デザイン性の向上やコストダウンも期待されている。紹介した全体工法と端部工法以外にも、例えば比較的面積が小さい空間では、構造的に検討された軽量の下地に膜材をタッカーで固定するだけ、或いは固定部分を隠す押し縁を加えるだけでも膜天井が実現出来る。素材の低コスト化に加えて、工法の簡素化にも工夫の余地は大いにある。

従来の照明を内部に組込んだ光膜天井では、管球の交換の為に膜パネルを簡単に着脱出来る納まりが求められ、その為に下地が重くなりパネルの落下の危険性が増すだけでなく、コストアップの要因にもなっていた。しかし、LED 照明の普及により交換作業を頻繁に想定しなくてもよい納まりも可能になりつつある。内装の改修頻度が高い商業施設等では、特に有効である。

又、一見不得意と思われる設備の貫通処理も、例えばスプリンクラーは単純に穴を開けて設置するだけでよくホツレ処理等は不要であるなど、必ずしも制約にはならない。

5. グラスウールボード天井の素材と工法

グラスウールボードを用いた天井も、表面素材や工法によっては、多彩な利用方法が可能である。以下、表 4.1.2.4～5、図 4.1.2.17 にそれらの特徴等を示す。

表 4.1.2.4　グラスウールボード天井の素材と特徴

種別	仕様	用途	長所	注意事項	適用（工法、事例）
ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み	GWﾎﾞｰﾄﾞ 1.6～4.8kg/㎡ ＋ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み	・機械室 ・ﾄﾞｰﾑ、ｱﾘｰﾅ ・多目的ﾎｰﾙ、映画館 ・ホテル ・店舗、ｵﾌｨｽ ・学校	・吸音性に優れる ・断熱性能がある	・衝撃に弱い	・ﾜｲﾔｰ吊り工法 ・立体枠工法 ・直張り工法 ・【10】【23】【25】
ｶﾞﾗｽ不織布張り	GWﾎﾞｰﾄﾞ 1.6、2.0kg/㎡ ＋ｶﾞﾗｽ不織布張り	・ｵﾌｨｽ、ｱﾘｰﾅ ・工場倉庫、店舗	・吸音性に優れる ・断熱性がある	・湿度に弱い ・衝撃に弱い	・ｼｽﾃﾑ天井等 ・【24】
塩化ﾋﾞﾆﾙｼｰﾄ張り	GWﾎﾞｰﾄﾞ 1.6、2.0kg/㎡ ＋塩化ﾋﾞﾆﾙｼｰﾄ張り	・ｵﾌｨｽ、ｱﾘｰﾅ ・工場倉庫、店舗	・吸音性がある ・断熱性がある ・汚れに強い	・熱に弱い ・紫外線に弱い	・ｼｽﾃﾑ天井等 ・【24】

注：ＧＷボードの質量は一般的な厚さ（クロス包み：ｔ50、その他：ｔ25）の場合の、面積当たりを表示

表 4.1.2.5　グラスウールボード天井の工法と適用

工法名	工法の詳細	特徴	長所	注意事項	適用（素材、事例）
ﾜｲﾔｰ吊り工法	複数のﾜｲﾔｰに専用金物で吊下げ	・大きなｽﾊﾟﾝで施工が可能 ・天井板を水平方法と垂直方向で吊り下げ施工が可能	・大きなｻｲｽﾞの天井板を施工できる ・天井板を水平方法と垂直方向に吊るして施工ができるので意匠性がある	・施工後に風の影響を受ける	・ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・【10】
立体枠工法	立体に組んだ樹脂枠に組込み	・施工床面積に対して吸音面積を大きくとることができる ・天井板の昇降にも対応可能	・可動式天井が可能	・施工時に専用部材が必要	・ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・【23】
ｼｽﾃﾑ天井	Ｔﾊﾞｰ間に落し込み	・天井板と照明や空調吹き出しなどの設備機器の設置が任意にできる	・天井板の取り替えが可能	・下地材施工時に振れ留めや落下防止措置が必要	・ｶﾞﾗｽ不織布張り ・塩化ﾋﾞﾆﾙｼｰﾄ張り ・【24】
直張り工法・ｼﾞｮｲﾅｰ止め	①ﾎﾞｰﾄﾞ端部をｼﾞｮｲﾅｰで押さえ込む ②本実付合せ部分に仕込んだ特殊ｼﾞｮｲﾅｰで下地に固定	・ﾎﾞｰﾄﾞを下地材とｼﾞｮｲﾅｰ間で押さえ込むので変位対応が容易 ・特殊ｼﾞｮｲﾅｰの場合、表面にｼﾞｮｲﾅｰが見えない	・既設の鉄骨を下地に使用するので施工が早い	・Ｒ天井には対応困難（曲率小）	・ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み ・【25】
直張り工法・ﾋﾟﾝ止め	接着と樹脂ﾋﾟﾝで固定	・安価で吸音、断熱効果が得られる	・施工が早い	・天井板の表面に押さえﾋﾟﾝ施工時にしわが発生することがある	・ｶﾞﾗｽｸﾛｽ包み

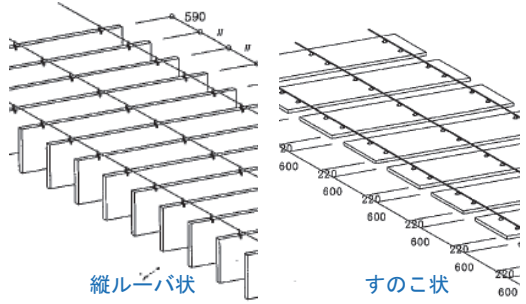
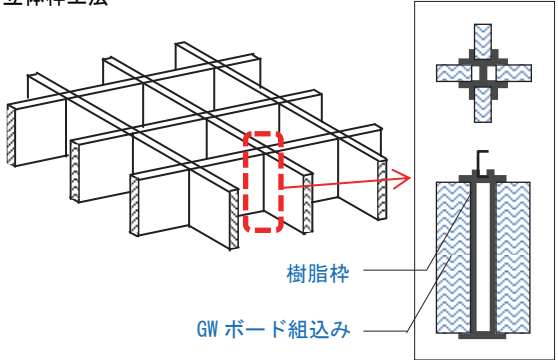
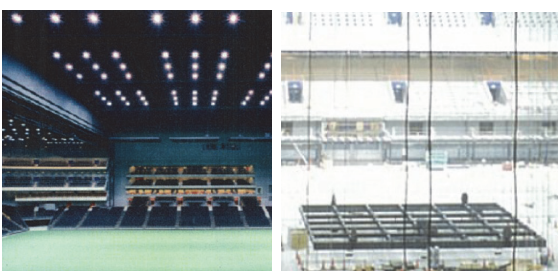
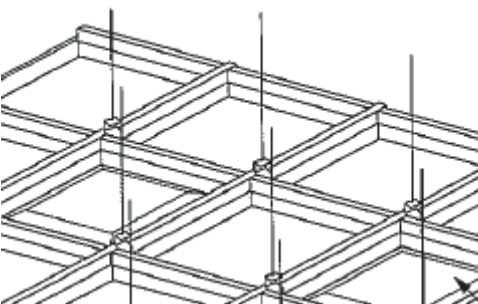
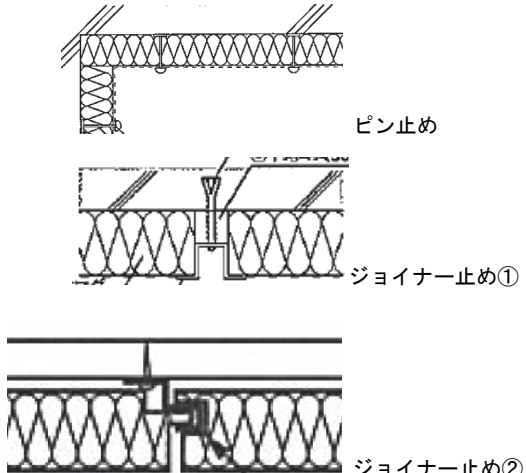
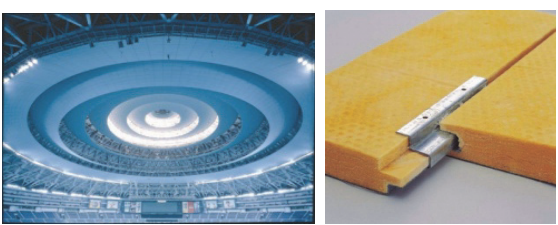



図 4.1.2.17　グラスウールボード天井　工法と事例

グラスウールボードの天井用の素材､及び工法は膜天井に比べると現状では選択の幅が限られている。しかし、吸音性能や断熱性能に寄与するところは大きく、コストも比較的安価なことから、**人命保護の観点からは大いに利用したい天井材・工法である。表面材の工夫や安全な工法の開発を材料製造業者だけでなく、設計者にも担って頂きたい。**

グラスウールボードは以前からさまざまな理由で高天井が落下した事例が多い。しかし、天井材そのものとしては安全性評価法から“安全”と言える数少ない素材であり、人命保護の観点から採用可能な天井である。但し、下地の落下防止対策は必要である。また、吸湿して重量が増した状態での脱落は危険であり、漏水や結露水に対する対策が必要である。

一方、体育館等は被災時の避難所等に利用される場合が多く、機能維持の為に下地、天井材の両方の落下制御が求められる。紹介した各工法の下地を構造的に検証すると共に、ボードそのものも下地への留め付け方を確実にするかフェイルセーフの対象とすることで､機能維持を実現出来る。

6. その他の軽量柔軟な天井工法の必要性

「3.1.1　安全性評価法」に示した判定では、現状で軽量柔軟な天井として採用可能な素材・工法は膜天井、グラスウールボード天井、岩綿吸音板天井（直張り）、及び天井高さが低い場合の一部のボード天井（石膏ボード単板、ケイ酸カルシウム板単板等）などに限られている｡ボードの場合は､下地と共に落下すると危険性が増し､安全とは判断出来なくなる。下地単独の落下も考慮すると、下地の落下防止対策（準構造化、フェイルセーフ等）が必要である。

上記以外の**天井材と工法の新たな選択肢が必要である。材料製造業者、設計者等の他、従来は天井を扱っていなかった異分野の素材メーカー等の参入が期待される処であり､行政や学術研究者等による後押しも不可欠である。**

参考資料

1)　「膜天井ガイドライン」:（一社）日本膜構造協会から発行予定

4.1.3　フェイルセーフの事例

人命保護を実現する工法として、「フェイルセーフ」の事例と特徴、採用する際の注意事項等を紹介する。

1.　人命保護とフェイルセーフ

フェイルセーフ工法はその他の天井工法の弱点をカバーするものである。確実な人命保護が考慮されていない既存の天井で更新が困難な場合や、**耐震性のみが考慮され、人命保護が十分でない場合の追加措置として有効**である。前者では、補強工事や仕様変更が困難な文化財としての保存建築物や寺社等に使われる場合も多い。

事例としては複数の素材、工法等が見られるが、落下対象の範囲をきちんと評価した上で設計・施工を行わないと、強度不足等をまねく危険がある。**天井全体の落下を対象とするのか、部分的な範囲に分けて対象とするのか、長期間使用するものか、或いは将来の改修までの有期のものか等を検討当初に設定し、関係者間で合意しておく必要がある。**前段の「3.1.2 フェイルセーフ」等を参照し、十分な検証を行われたい。又、新たな工法の技術開発にも期待したい。

2.　落下防止ネットの事例

2011 年東日本大震災以前から、落下防止ネットの採用例は多い。静岡の多くの体育館等で採用された例は広く知られている（【26】図 4.1.3.1）。

参考事例【27】（図 4.1.3.2）はスポーツ施設にナイロン製ネットを用いた事例である。

図 4.1.3.1　参考事例【26】　静岡の体育館

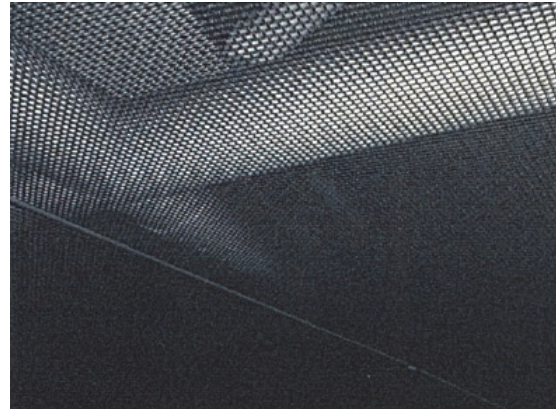



図 4.1.3.2　参考事例【27】

工法として最も一般的なものは、図 4.1.3.3～4 のように部屋の両端間にケーブルを張り、樹脂製のネットを接続金物や結束ロープで結束する方法である。ケーブルは長さに応じて、中間部でも支持している。これは、土木構造物（主に RC 造の橋梁や高架道路等）の老朽化に伴うコンクリート片の落下対策に用いられている「はく落防止ネット」と同様の工法であり、ある程度の重量物（コンクリート片）に対応出来るものである。但し、天井全面が落下することを想定すると、ケーブルの張力等が過大になる為、部分的な落下への対応策と考え

るべきである。

又、ケーブルの端部や中間部での躯体への取付方法にも十分な配慮が必要である。躯体への負荷、アンカー方法（特に改修時の後施工アンカー等)、取付金物の脱落防止等に注意を要する(取付部の耐力、強度の注意事項は 3.1.2 項も参照。)。

ネットの素材としては、ポリエステル系やナイロン系の防炎品が用いられる場合が多いが、適用する部屋の環境によってはＳＵＳ等の金属系ネットも考えられる。又、前出の膜天井にあったメッシュ膜他をフェールセーフ目的で活用することも有効である（表 4.1.2.2)。

但し、落下防止ネットは面材には有効であるが、ネットの形状、格子目の寸法によっては吊ボルト、野縁等の線材や照明のガラス片等は抜け落ちてしまう可能性があり、それらに関する別の対策の要否も合わせて検討する必要がある。又、**ネットの劣化や張力の維持等を継続的に確認することを怠ってはならない。**

［中間部］　　　　　　　　　　　　　　　　［端部］

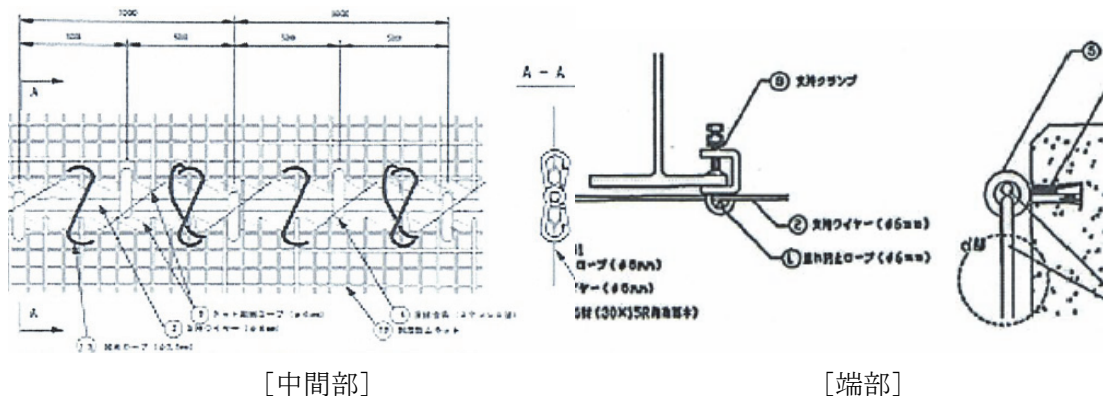



図 4.1.3.3　ケーブルとネットの取付例(取付部の耐力、強度に要注意。3.1.2 参照。)

［中間部］　　　　　　　　　　　　　　　　［端部］

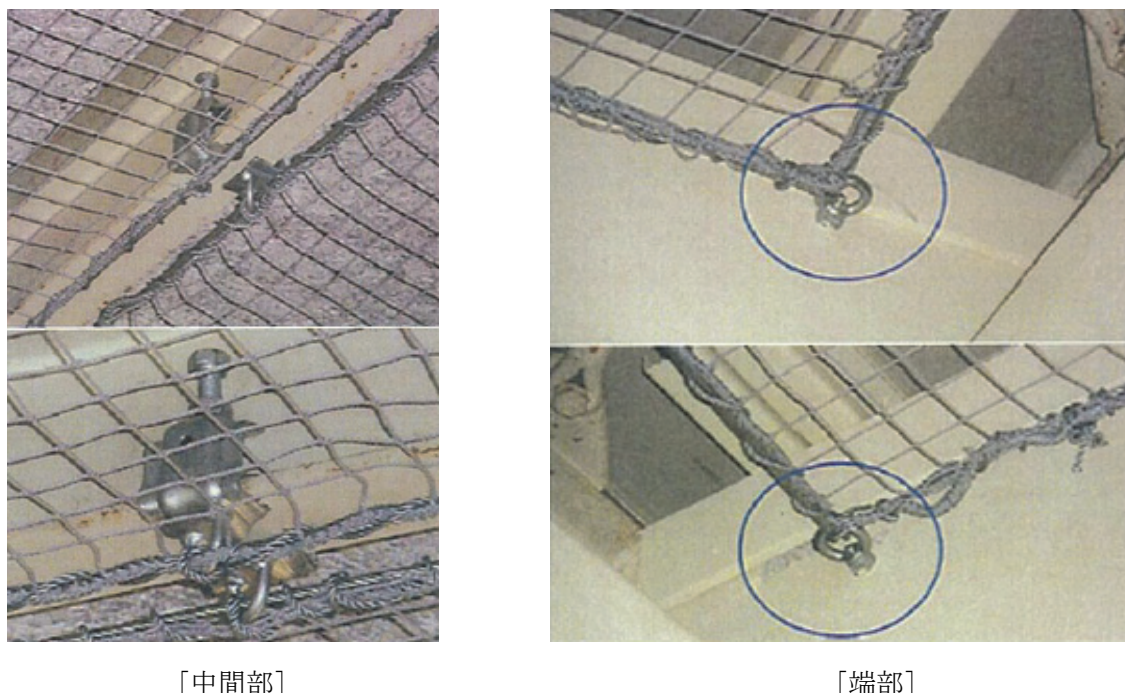



図 4.1.3.4　ケーブルの取付例(取付部の耐力、強度が十分でないものもある。3.1.2 参照。)

3. 落下防止ワイヤーの事例

落下防止ワイヤーによる対策もある程度の効果が期待出来る。落下防止ワイヤーは他の対策との併用が容易である。又、他の対策が困難な天井内が混みいっている場合等でも採用し易いことが特徴であり、既存天井へ付加的に行う改修にも対応可能である。又、市販品等もあり、費用面でも比較的採用が容易である。

但し、**天井荷重とワイヤーサイズや吊ピッチの検討、余長のコントロール、吊元の強度確認等を怠ると落下を防げない可能性があり注意を要する。衝撃係数が把握されている場合を除き、実証実験等により有効性を確認する必要がある。**

落下防止ワイヤーの参考事例を以下に示す。軽量鉄骨下地同士を下から上へ（野縁から野縁受けへ、野縁受けから吊りボルトへと順次吊るすタイプである（図 4. 1. 3. 5～6)。

図 4.1.3.5　落下防止ワイヤーの参考事例

図 4.1.3.6　同左

図 4.1.3.7　ワイヤーの開発事例

図 4.1.3.8　落下実験時の効果 [1)]

他にも、岩綿吸音板を直に吊るすタイプが検討されている（図 4. 1. 3. 7)。

図 4. 1. 3. 8 はある天井の落下実験の際に効果が確認された落下防止ワイヤーの事例である。3 軸振動台で加振する天井下地を X、Y 方向とも約 2m ピッチで樹脂ワイヤーで上部構造に緊結した処、天井が下地とともに落下した際に受け止めることが出来た。しかし、ワイヤーは野縁に留められているため、ボードそのものの落下を防ぐ工法とはなっていない点に注意が必要である。

現状では図 4.1.3.9 ①のように下段の天井下地材を上段の下地材や吊りボルトとワイヤーで結ぶ例が多い。これ以外にも、②面材を直に吊るす、③面材とワイヤーを一体として製造する、④面材の下にネット等を設けて吊るす等のバリエーションが工夫されることが望まれる。④はシネコンのように遮音と吸音を必要とする天井をイメージしたものである。尚、この場合の下地ネットは前出の張力を導入した落下防止ネットとは異なり、多数のワイヤーで天井裏から吊るされた受け材である。但し、重量のある天井では落下防止効果（安全性の確保）が限定的であることから、「3.1.3　準構造」他で示す準構造等の採用も積極的に検討し進める必要がある。

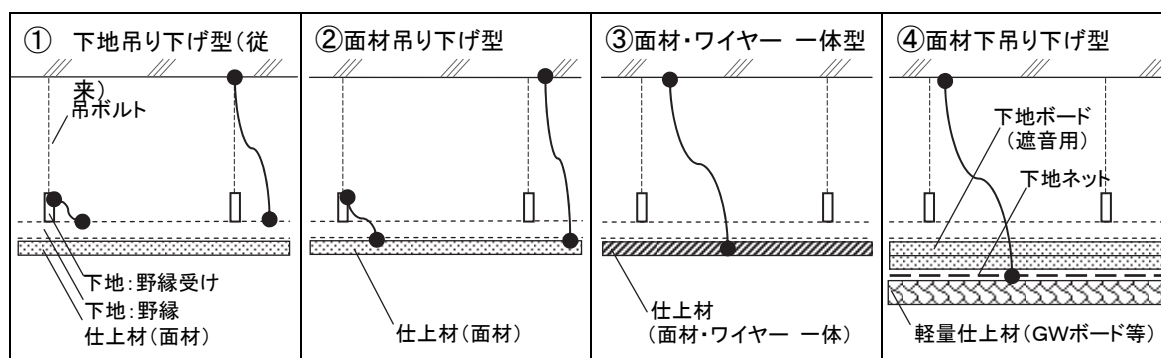



図 4.1.3.9　落下防止ワイヤーの概念図　（参考）

フェイルセーフとして有効であるためには、ワイヤーの上部での緊結先にも注意する必要がある。吊ボルトに緊結する場合が多いが、ボルトの長さや斜材の取り付き方、インサート等の状況次第ではボルトの破断や脱落の可能性がある。安易に吊ボルトを選択すること無く、吊元の状況をよく把握することが大切である。吊ボルトを鉄骨から吊る場合は、使用するクランプの脱落対策が必要である。

フェイルセーフ工法を一つの連続した天井の一部だけに採用してはならない。**一連の天井全体に均等に設けることが大切である。**

又、2011 年東日本大震災では、軽量鉄骨下地はある程度健全でも面材のみが落下する“ビスの頭抜け現象”が多数報告されている（図 4.1.3.10)。この場合は上記の落下防止ワイヤー工法の内、①の下地のみを吊る方式では落下防止効果が無いことから、②以降の検討が必要になる。

又、機能維持の各工法を有効に働かせる為にも、“ビスの頭抜け”そのものに対する対策の開発も必要である。頭抜け対策の検討事例としては、ビス止め時に金属製ワッシャを用いたものがある（図 4.1.3.11～12)。ビス頭周囲でのコーン破壊を軽減する効果がみられる。機能維持の損傷制御に利用することは可能である。

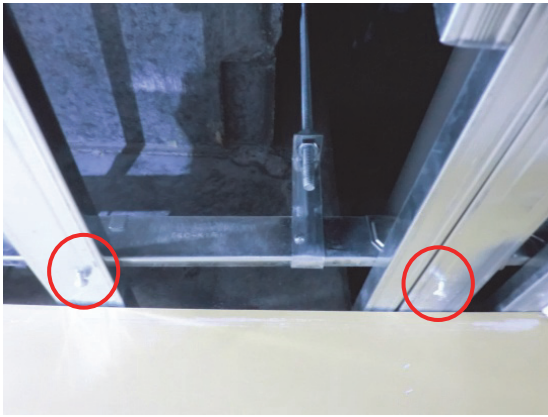



図 4.1.3.10　ビスの頭抜け現象

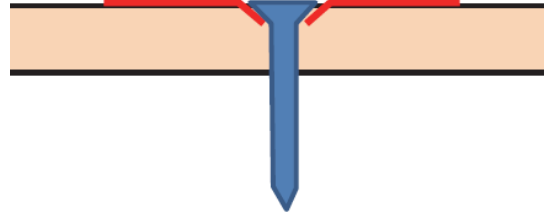



図 4.1.3.11　ビスの頭抜け対策案

図 4.1.3.12　ビスの頭抜け対策案（実験）

参照画像等

1）　E-Defense での非制振状態における加振実験記録動画より（2009 年 3～4 月、免震制振実験 WG、主査：東工大笠井和彦教授）

4.1.4　準構造での計画

フェイルセーフも困難なほど大きな重量の天井を設ける必要がある場合は、構造部材を用い構造計算を行って天井を計画することが有効である。このような天井は、劇場や音楽ホール、映画館などの公共性の高い建物に多く、天井高さも高いものが多い。その為、構造技術者との協働により、確実な耐震性能と脱落防止性能を付与する必要がある。

構造技術者による部材、接合部耐力の確認を行い、施工も構造部材として行う。天井仕上げ面は構造部材又は構造部材と同等のレベルで品質を管理された部材にて構成し、接合部強度が確実に保持され、経年変化に耐えうる機構で固定されることが望ましい。例えば音響上の反射機能を実現するためにPC板やGRCボード等を反射面の機能を持つ天井・壁材として直接構造材に固定する計画として設計･施工する。更に、意匠上の仕上げが必要な場合には、別に軽量柔軟な天井を計画する等が考えられる。

以下に準構造として計画・施工された事例を紹介する。先に述べたように、本来天井を準構造として計画する場合には、天井面まで全てを構造部材として設計･施工すべきところではあるが、改修工事など様々な制約条件のある中での対応の事例として、ここでは天井下地までを準構造として計画・施工された事例を２例紹介する。

1.　（事例－１）既存天井の音響性能を確実に復旧する為に天井下地までを準構造としたホールの復旧事例

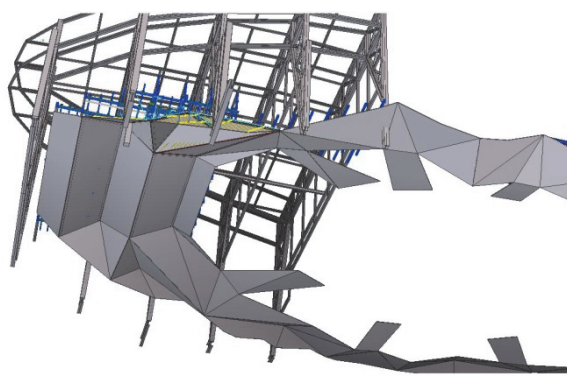
(1) はじめに

ここでは、2011 年東日本大震災により落下した音楽ホールの重量天井の復旧において、重量天井の安全性を確保すると共に、既存天井の音響性能を復元するべく、天井下地までを準構造として設計・施工した事例の概要について述べる。

(2) 復旧対象の天井の特徴

復旧対象の天井は、鉄骨造一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄筋コンクリート造、地下2階、地上8階建の建物の地上4階から8階に配置された音楽ホールの天井である。この天井は、音楽ホールとしての音響性能を確保する為に、天井材に繊維混入石膏板の重ね貼り（8㎜×5枚、総厚40㎜、約65kg/㎡）を使用して低音反射特性を向上している。

天井の平面形状は、長辺約64m、短辺約36mの不整形な楕円形となっており、天井面の高さは最大で約22mである。

この天井は、平面及び断面とも非常に複雑な形状となっている。その為、建物本体の構造部材面から天井仕上げ面までの吊り長さが場所によって大きく異なっており、天井面にも大きな段差がある。図4.1.4.1に複雑な天井面のパース及び写真を示す。

見上げのパース

内観写真

図 4.1.4.1　複雑な天井面のパース及び写真

(3) 天井の設計

（ⅰ）天井設計用地震力の設定

この建物の天井は、建物敷地で起こりうる最大級の地震が生じても落下しない事を設計条件としている。そこで、建物敷地地盤における地震危険度を評価して模擬地震動を作成し、建物モデルに入力して地震応答解析を行った。応答解析結果から、天井を吊る階（R 階）の応答スペクトルを作成すると共に、部分実大試験体による性能確認実験で使用する入力波を作成した。この性能確認実験から、防振ゴムにより本体建物と切り離された天井架構の振動特性を確認して、天井の設計用震度を余裕を持った設定値として、水平震度 2.0G、鉛直震度 1.0G に設定している。

（ⅱ）部材設計の概要

天井の復旧に際して実施した天井下地材の補強の考え方を図 4.1.4.2 に、天井下地の構成を図 4.1.4.3 に、天井下地の写真を図 4.1.4.4 に示す。

天井下地材について、ホール中央部の比較的平坦な天井部分では、稜線部の補強及びブレースに C 形鋼を用いており、外周の複雑な天井面の形状に対しては、配置の自由度の高い丸パイプ(単管)を稜線部の補強材及びブレース材に用いている。また、天井ボードの稜線部には補強プレート（稜線金物）を設置している。下地材の接合に用いる金物は、接合部ですべりの生じないディテールとした。新規開発の金物には、①防振吊り用ハット型金物、②吊りハンガー、③野縁受け吊り金物、④野縁・野縁受け接続金物、⑤パイプブレース接続自在金物(3 種類)があるが、これらの金物については全て強度試験を行い安全性を確認している。

既存ぶどう棚から天井面までの吊り長さが長い部分には、その下部に新規にぶどう棚を設置し、吊り長さは原則 1.5m以下としている。

天井と壁等の取り合い部については、本体建物及び天井架構の大地震時の変形量と仕上げ材の納まりから、天井面と周囲の壁等の間のクリアランスを 100㎜ 以上確保する事とした。

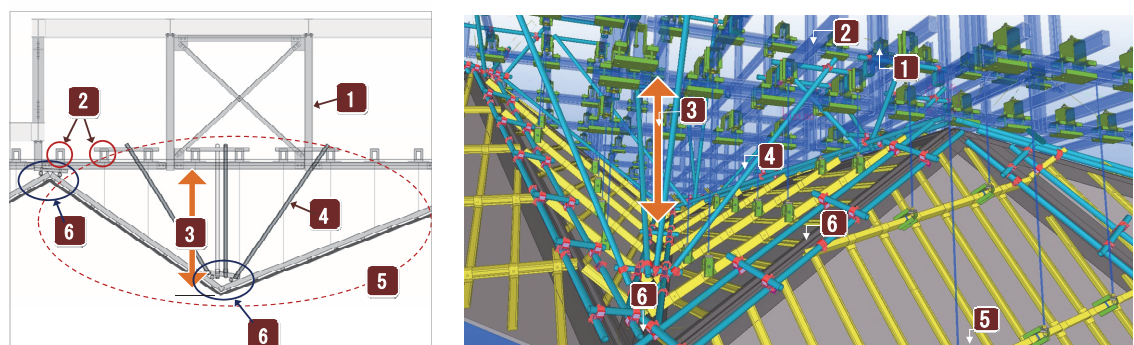
繊維混入石膏板と下地材の固定強度についても、各層毎のボードジョイントの位置、使用するビスの種類、及びビス止めの仕様（ピッチ、配置方法など）を決定して、鉛直方向及び水平方向に対する強度確認試験を行い、十分な強度のある事を確認の上施工している。

1 強固な鉄骨棚下地と新開発防振金物を設置
2 鉛直1Gに耐える角パイプにグレードアップ
3 基準ふところ高さを原則1.5m以下に設定
4 水平力2Gに耐えるブレースを配置
5 全ての金物強度は試験で確認の上使用
6 天井の山、谷部分の接合部分はプレートとパイプで補強
7 天井・壁の取り合い部に十分なクリアランス確保

図 4.1.4.2　天井下地材の補強の考え方

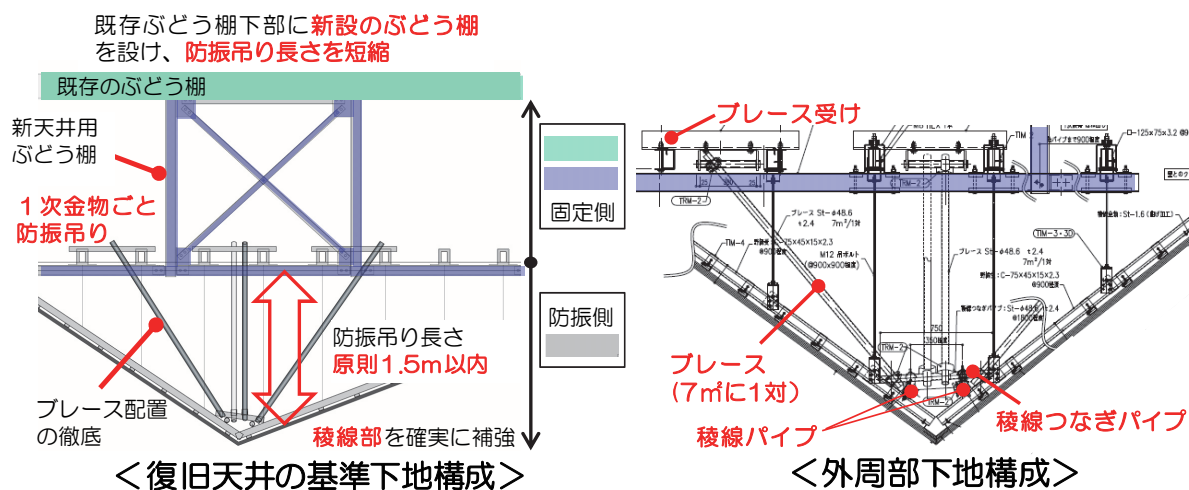



図 4.1.4.3　天井下地の構成

図 4.1.4.4　天井下地の写真

（iii）性能確認実験の概要

防振ゴムを介した架構の振動性状を実験的に確認する為に、不整形な天井の一部分を実大で再現した試験体を対象に、2 次元加振装置を使いた性能確認実験を行なった。入力波は、敷地地盤における最大級の地震に対する建物モデルの地震応答解析から得られた、天井を吊る階（R 階）の応答結果から設定している。図 4.1.4.5 に振動台実験試験体を、図 4.1.4.6 に振動台実験の状況を示す。この実験から、防振ゴムを介した天井下地架構の振動性状を確認し、天井及び天井下地架構等が極めて稀に生じる地震動に耐える設計を行い、復旧工事に着手した。

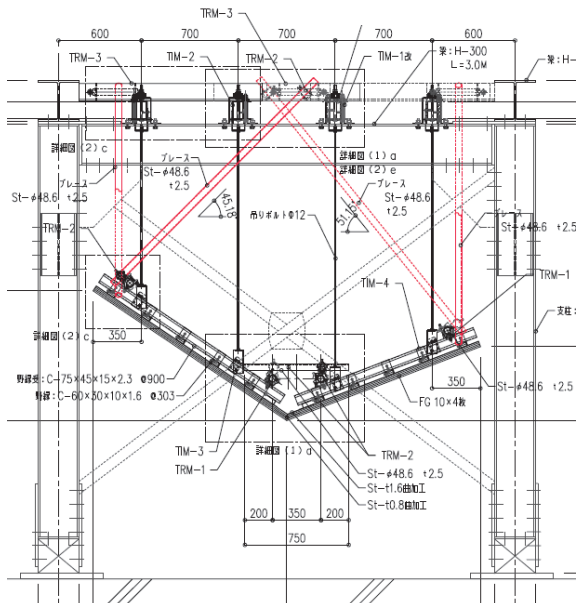



図 4.1.4.5　振動台実験に用いる部分実大試験体

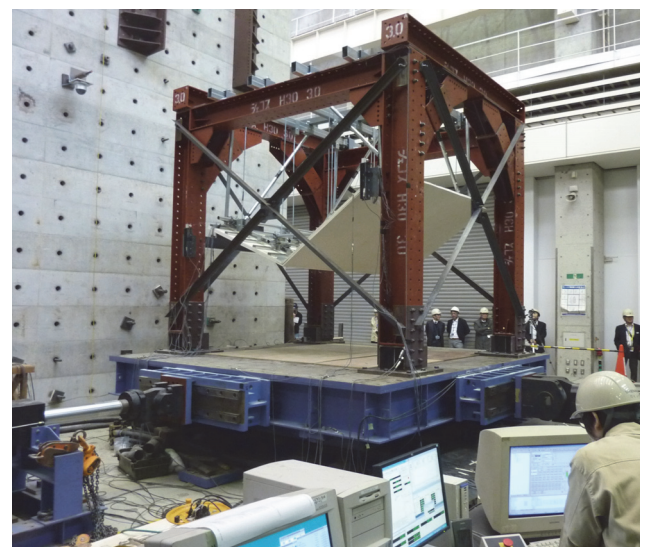



図 4.1.4.6　振動台実験の状況

（4）施工写真

以下に施工写真を示す。

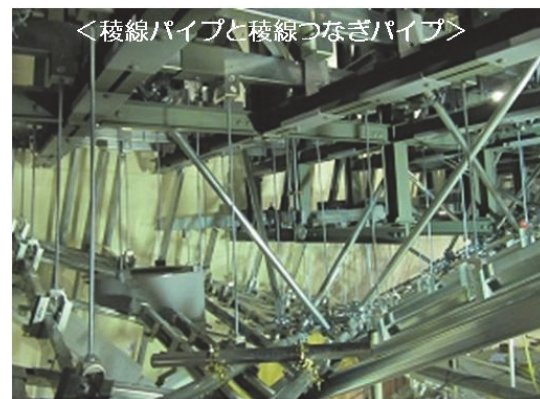



図 4.1.4.7　ぶどう棚、稜線・稜線つなぎパイプの状況

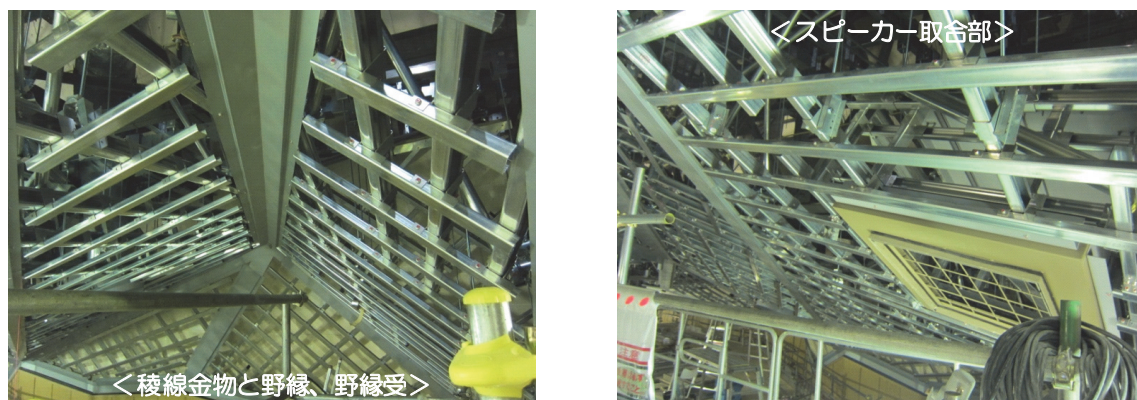



図 4.1.4.8　稜線金物、野縁・野縁受の状況

図 4.1.4.9　繊維混入石膏板の施工状況（１）

図 4.1.4.10　繊維混入石膏板の施工状況（２）

2.　（事例－２）天井下地までを準構造としたホールの事例

ホールの天井下地を準構造として計画した事例を、図 4.1.4.11 に示す。繊維混入石膏板 8mm×4 層（≒54kg/㎡）の天井材を約 14m の高さに天井として設置する際に、下地架構およびその接合部、耐震要素を構造材として設計施工している。この事例では、基本的には天井を吊る要素が無く、鉄骨下地（角パイプや C 形鋼）にボード材を直貼りする仕様としている。

重量鉄骨により天井の形状なりの下地を構成し、地震時に下地に生じる水平力は外周の躯体に伝達するよう処理を行う事で、天井下地鉄骨の過大な変位を制御している。

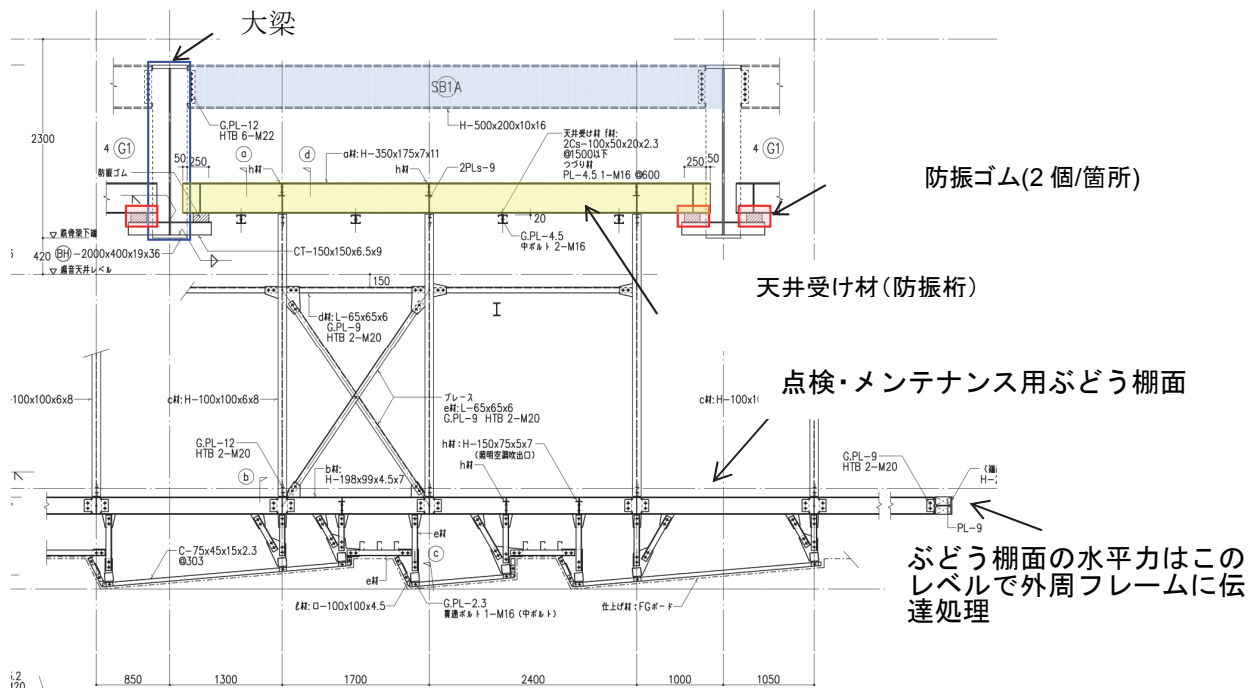
ボードは天井下地鉄骨に直接ビスにより固定している。図 4.1.4.12 にボードの重ね貼りの例を示す。ボードの重ね貼りの部分はビスどうしの干渉を防ぐため、ボードジョイントの位置を各層ずらしながら接着剤併用で施工している。施工中にビス引抜き耐力のサンプリング試験を実施したところ、ビス 1 本当たり 50 倍から 100 倍の安全率を確認した。

天井下地　地組状況　　　　　　　C-75×45　@300 のボード張り下地

図 4.1.4.11　ホールの天井下地を準構造として計画した事例

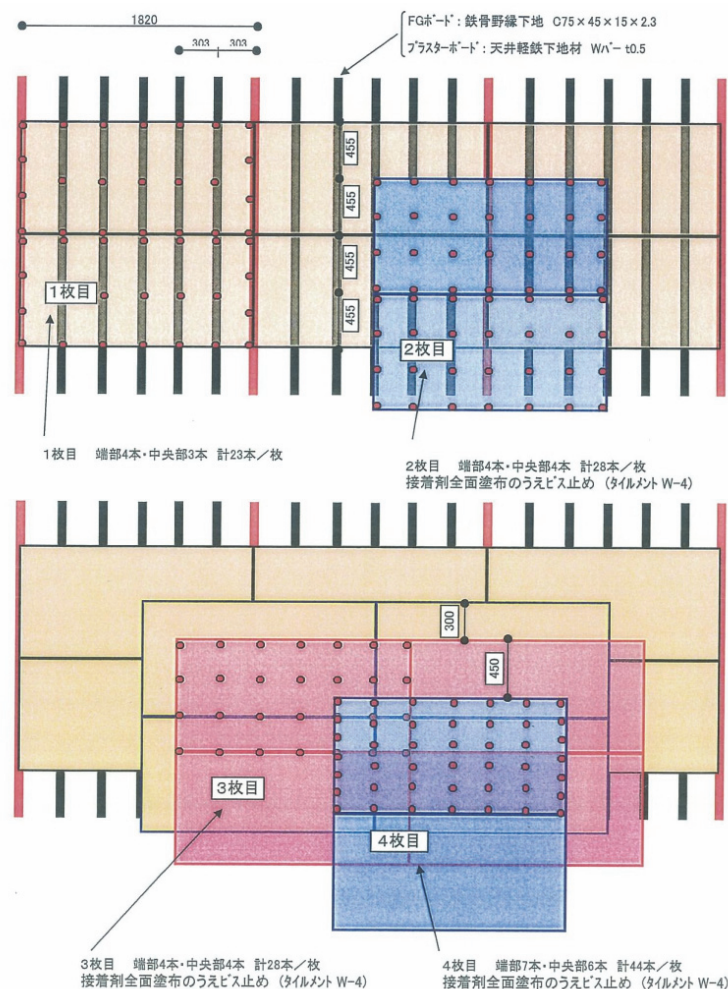



図 4.1.4.12　ボードの重ね貼りの例

3. まとめ

ここでは、天井下地までを準構造として計画・施工された事例を２例紹介した。しかし、劇場やコンサートホール等の音響天井のように質量の大きな天井が必要な場合は、本来はこれを仕上げ材の質量に頼ることなく、PC 板や GRC 版などの構造材を用いて、構造として安全に実現することが望ましい。そして、このような天井の設計には構造技術者と音響技術者が深く関わることとなる。しかし、現状では構造材で作られた天井の音響性能に関する知見が乏しいため、音響技術者が自信を持って構造材による音響面を採用するに至らない。安全でかつ音響性能の高い天井の実現のためには、構造技術者と音響技術者が協働して、準構造による音響天井の性能に関する知見を蓄積していくことが重要となる。

また、ボード材料のビス固定耐力は湿度影響を受けやすく、繰り返し外力に対して徐々に耐力低下していく恐れがある。温度変化による強制変形の繰り返しも損傷を広げる要因となる。さらに想定を超える地震動等に遭遇すると、この部位への応力集中と繰り返し荷重により損傷する懸念が残る事から、現状では、ボード材自体の落下防止対策が併用される事が望ましい。最終的には、天井面を含めた完全な準構造化が必要である。

4.1.5　人命保護工法について

人命保護を確実に実現する工法を、機能維持を目的とした損傷制御とを明快に区分して捉え、それぞれの技術と工法の開発を積極的に行い、安全で安心かつ豊かな建築空間を築くための選択肢を増やしていくことが重要である。

人命保護に有効な工法と事例の紹介を行ったが､新築にとどまらず既存の建築物のストックを含めた膨大な天井への適用を考えると､技術や工法の開発が大きく不足していると言わざるを得ない。震災以降、機能維持を目的とした工法の開発は少しずつ進んできているが、人命保護については、いまだ旧来の工法の延長性上に過ぎないと思われる。

より幅広い素材や工法の開発が急務であり､改修への適用性の向上や低コスト化も重要である。その為には別章でも触れられているように、天井に関係する全ての関係者の意識改革が是非必要であり、開発と普及が早期に推進されることが期待される。

4.2　機能維持工法の事例

天井は様々な外乱に対して様々なレベルの機能維持が要求される。機能維持性能の向上のため、人命保護を確実に実現した上で、下地補強のみならず、より安全安心な新工法の開発も積極的に行われるべきである。

(1) 在来軽天工法による地震時損傷制御(耐震工法)事例

地震時の機能維持のための工法としては、天井ふところ側から行う在来軽天工法の下地補強による方法は様々な提案がなされている。昨今公表されたこれらの工法では、3.2.3 項に示す軽量鋼製下地の特性をよく把握し、振動台実験等により性能が確認されたものが多い（図 4.2.1～4)。

これらの工法においてブレースを設計する際、採用する接合部形状によって有効座屈長さを特定したうえで部材選定を実施するのがポイントといえる。原則として下端接合部は接合部材の曲げ変形や滑り等による変位の制御, 上端接合部は吊ボルトを中心とした回転運動や接合部の滑り等による変位の制御を実施する必要がある。既成の部品を採用する場合はその特性をよく把握するか, 設計外力に対し有効に機能する専用金物を新たに製作し採用することが望ましい。

紹介した事例以外にも、各天井下地メーカーから「耐震天井下地」等として商品が市販されている。これらの採否は、3.2.3 項の天井下地計画上のポイントに注意して適用箇所の特性に合った採否決定を行う必要がある。中には使用条件を見誤ると、大規模な連鎖崩壊が懸念される工法も見受けられる。ここでも採用する側の十分な知見が必要となる。

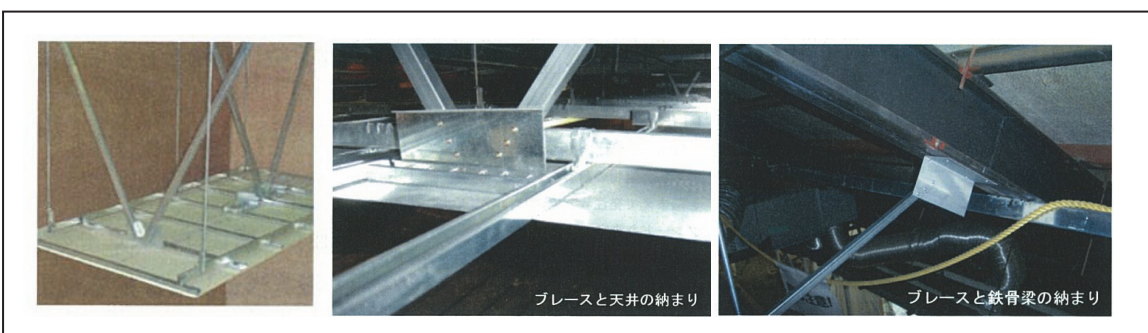



図 4.2.1　地震に対する損傷制御効果が期待できる天井下地の例①

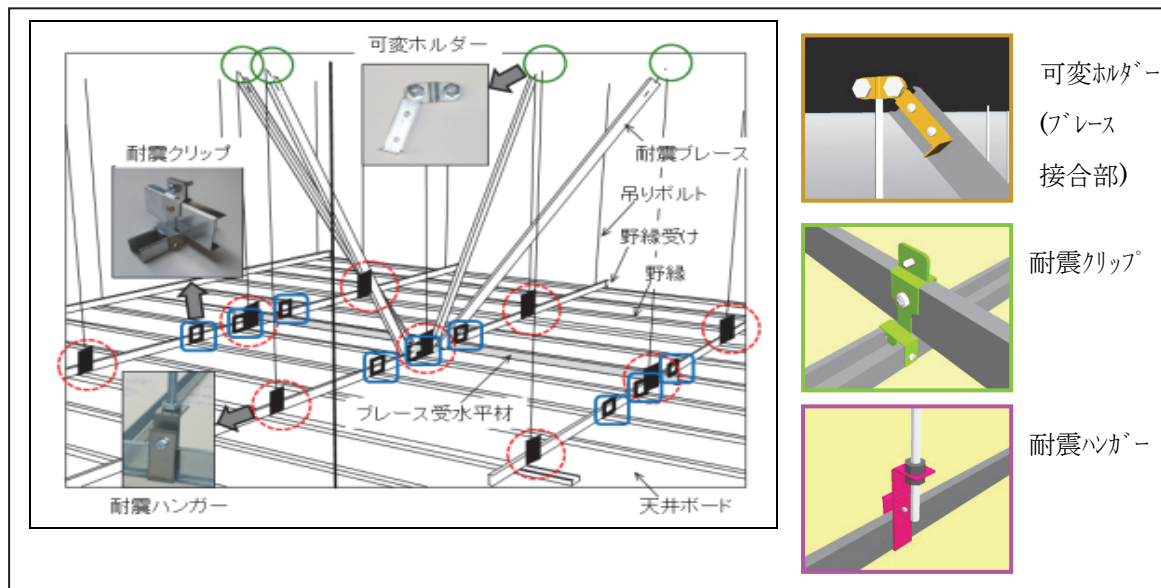



図 4.2.2　地震に対する損傷制御効果が期待できる天井下地の例②

図 4.2.3　地震に対する損傷制御が期待できる天井下地の例③

「吊りボルト圧縮補強材とX型ブレースを組み合わせた高耐震天井」

■システムの特徴

- 天井に固定される間仕切り重量の1/2を見込む。
- 天井面の位置から設置できる。
- ブレース等の交点では偏心を最小として強度を高める。
- 実験により弾性範囲であることを確認している。
- 既存の天井補強にも転用できる。

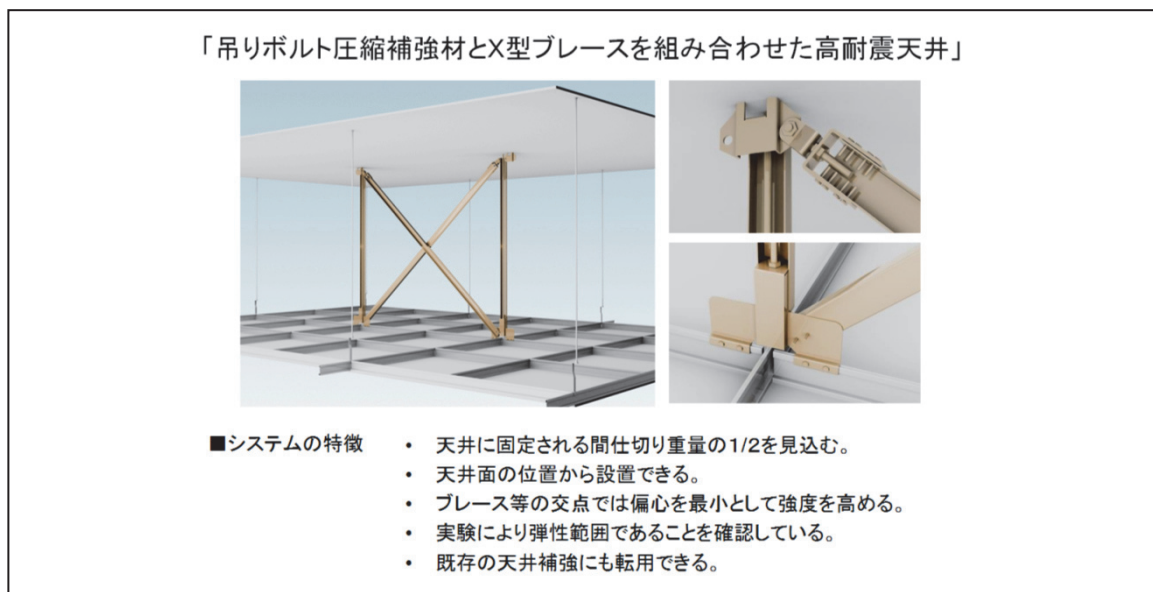



図 4.2.4　地震に対する損傷制御が期待できる天井下地の例④

(2) 下から支える新たな工法の例

地震に対する損傷制御のうち、在来軽天工法の下地補強に依存しない、天井下面の室内側から行う損傷制御法の開発なども進められている。人命保護を確実に実現したうえで、様々な構法が開発されることで利用者の選択肢が増えることが望ましい。

この構法は，地震時に発生する天井の慣性力を，天井と一体となるよう設けられたケーブル・引張材等の補強材に伝達し，補強材の端部を躯体に緊結しておくことで天井慣性力を躯体に伝達する方法である。
補強材はケーブル等を用いるものや,比較的軽微な鉄骨部材を用いるものなどが開発されている（図 4.2.5～6)。

既存天井の耐震改修にも採用可能なほか， 吊構造では制御しづらい天井(非常に天井ふところが大きい、等)の機能維持工法としても有効である。

こういった工法を計画する場合の注意点は，天井材と補強材をいかに一体にできるか，という点と，天井材が鉛直方向の支持力を失うような場合（クリップがはずれる，吊りボルトが破断する，などして天井の自重支持機能が喪失した場合）天井重量を補強材が負担することになるため、補強材には非常に大きなスラスト荷重が生じる。この荷重に十分注意し、接合部などを含めた設計を行えば,フェイルセーフ機能の一端を補強材に担わせることも可能となる。さらにメッシュやネット等と併用することで小さな部材の脱落の防止も可能と思われる。想定を超える地震時にも天井の崩落を防止し，人命安全を確保し避難を可能とする機能も併せ持たせられる可能性が出る。

ケーブルによる屋内側からの損傷制御方法の例

天井面や仕上げ面に対して屋内
側から行う損傷制御法
（東京大・川口等による）

実大実験風景(人力載荷実験)
（東京大・川口等による）

図 4.2.5　ケーブルによる屋内側からの地震時損傷制御方法の例

当工法は､天井室内側にケーブルを放物線等の有効な形状となるように金具で天井材に留め付け、ケーブル端部を周辺部の柱や梁などにアンカーするというものである。これにより地震時にケーブルが天井全体に水平挙動を抑制する効果を狙っている。

実験[1)]によって､ケーブルの導入張力はわずか100N程度でも､天井の最大応答変位は40%～70%程度低減されることが確認されており、水平剛性は導入張力 500N、1000N に対し X 方向で無補強時に対し 6.2 倍、8.7 倍に、Y 方向でそれぞれ 2.2 倍、4.2 倍となる効果が確認されている。

鋼材による屋内側からの損傷制御方法の例

実大実験風景

格子状の引張材を既存天井面に緊結

端部を構造体へ接合

完成予想図

既存の天井面に格子状の鋼材を下から天井面に緊結し、その端部を構造部材へ接合して、天井面に生じる水平力を躯体へ伝達する方法。

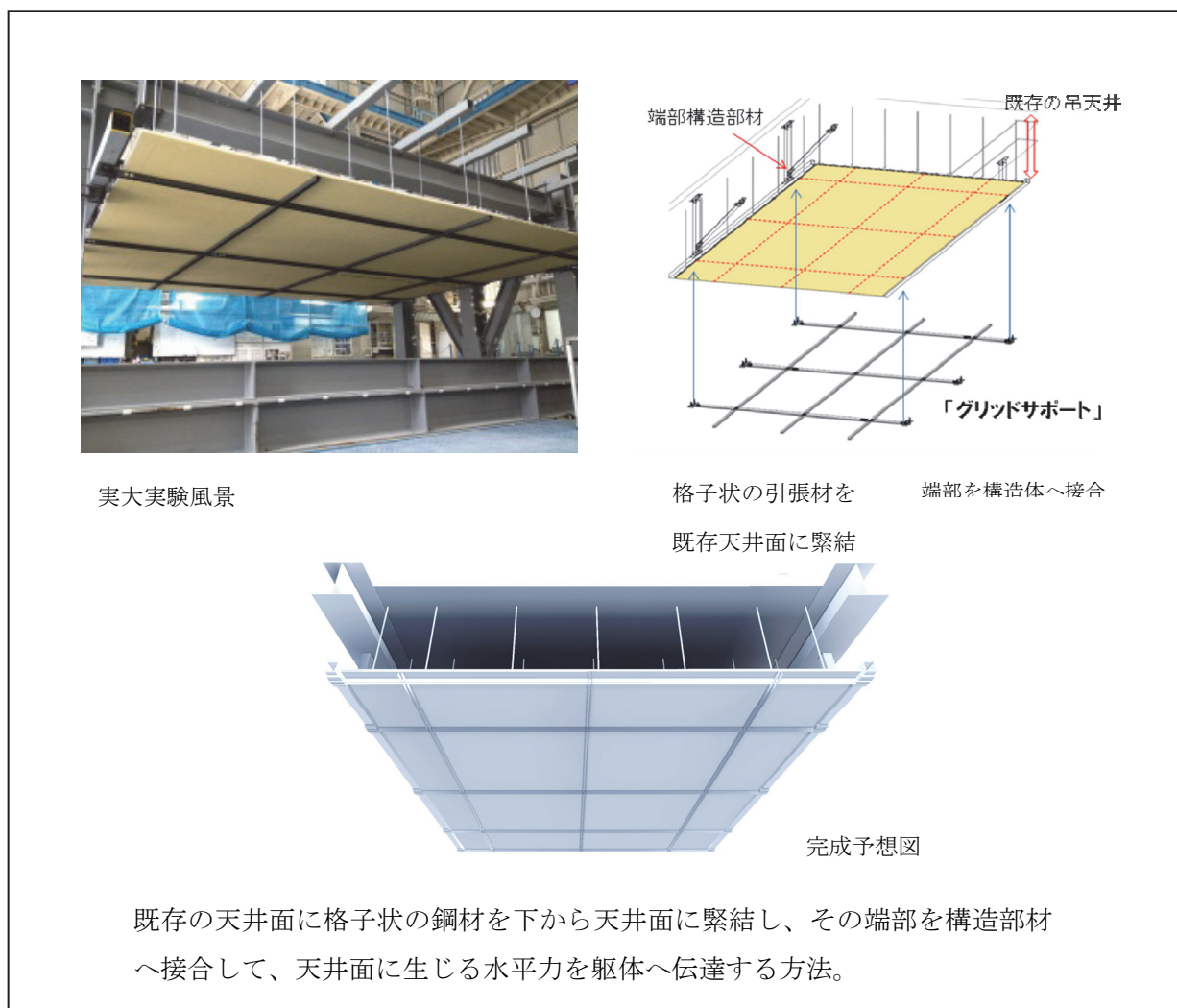



図 4.2.6　鋼材による屋内側からの地震時損傷制御方法の例

当工法は、地震時に天井面に生じる慣性力を引張材（軽微な鋼材等）を介して周囲の構造部材に伝達することにより、地震時の天井面の変位を制御し、天井の損傷・脱落の主な原因である下地接合部への繰返し曲げ等の負荷を軽減することができる。ブレースを用いて天井慣性力を躯体に伝達する方法に比べて、より直接的に躯体に力を伝達することができるため、平易な机上計算で部材設計が可能である。

また本構法は、万一天井が鉛直支持力を喪失しても、グリッド状の引張材によって天井面全体の大規模な崩落を防止する機能を併せ持っている。さらに、下地材の主材に一般普及材（非 JIS 材）を使用した天井で、ブレース等の耐震対策を施していない天井に対しても一定の耐震性能を付与することができる。

櫻庭らが実施した動的振動台実験[4]によると、一般普及材で構成した天井（質量 20kg/㎡）に当工法を適用したところ、目標とした天井面加速度 3.3G の慣性力に対しても、部材

が軽損にとどまり軽微な補修で継続使用可能であることが確認されている。

当工法にメッシュやネットなどを併用すれば､さらに小さな天井及び付属部材の落下も防止可能である。

参考文献

1)　中楚洋介、川口健一、大矢俊治、荻芳郎、小沢雄樹、森雄矢：ケーブルを用いた既存天井の耐震補強方法に関する基礎的研究その 1～3：日本建築学会学術講演梗概集（東海）20446～8　2012 年 9 月

2)　日経アーキテクチュア　2012-3-25 天井は「軽く、柔らかく」　P58～60

3)　小澤祐周，川口健一：非構造材落下防止ネットの力学と形状に関する基礎的考察，日本建築学会　構造工学論文集　Vol.56B（2010 年 3 月）

4)　櫻庭 記彦，　金子 美香，鈴木 健司，内本 英雄，田中 栄次：既存天井の後付け改修用「グリッドサポート構法」の開発：清水建設技術研究所報　2013

豊かな内部空間を演出する天井２

可動式準構造による巨大天井　大阪ドーム・スーパーリング

施設全体はプロ野球を始めとする多目的ドームとして計画されており、可変式の大天井、間仕切り幕、大型人工芝巻き取り装置、2 分割して回転する観客席などが導入されている。屋根構造はドーム本体部(直径134m)とドーム脚部(幅約 16m)とに分かれて構成されている。ドーム中央部の直径 76m の屋根部は透光性のあるポリカーボネイト材によって葺かれている。

多様なイベントに対応できるように、屋根面から６重の巨大なドーナツ状リング型天井が吊り下げられており、ウィンチで上下に動かす事ができる。リングの下面は、中央に向かって 15 度の角度で傾斜している。これにより、屋根からの採光や、音響特性などを調整する事ができる。リングの構造は円形鋼管とロッド材を併用したシステムトラスで、トラス成は 1500mm～3152mm。６つのリングの外周直径は 18m ずつ増えており最大の可動リングは外周直径 108m、重さ 110t。リング全体の重量は 323tf である。

リングの下面はグラスウールを布で覆った板が取り付けてある。可動天井の下には照明器具や影像装置を取り付ける 52m×16m のグリッドトラス(葡萄棚)や、空間を分けるためのウォールカーテン（間仕切り幕)などが吊り下げられるようになっている。スーパーリング全体での追加の吊り荷重は 102tf と設定されている。

可動天井の耐震対策として、吊りワイヤロープを円周方向に V 字に配置し、昇降用ワイヤーロープの長期荷重に対する安全率を 10 としている。また、衝撃吸収装置として、高減衰ゴム(ブチルゴム製、減衰定数 20%)をリングの全吊り点 51 箇所に設置している。

参考：空間構造の耐震設計と設計例，日本建築学会，2001 年

第５章　課題と提言

5.1　意匠設計者の啓発

意匠設計者の適切な設計と材料選択により、天井等非構造材の落下事故の危険性は大幅に軽減される。

落下すれば人命への影響がおよぶ、また機能維持にとって障害となる天井について、その高さや形状、材質（天井材の種類）を決めるのは意匠設計者である。一方、安全性に関する判断や発注者の説得などは、意匠・構造・設備のタテ割りでは対処できない。意匠設計者は総合的立場に立った設計者であることをまず自覚すべきである。

これまで、天井の設計が｢天井材を選ぶ｣、｢工法を選ぶ｣のようにルーチン的であったこと、階高低減と居住空間最大化のしわ寄せが天井懐に来てしまったこと、発注者や法令等の要求する安全性のみに関心が強かったことなどが反省事項として挙げられる。

1. 天井の｢ありよう｣を決めているのは意匠設計者

天井落下が人命を脅かし、施設の機能維持や BCP にとっても障害となることが問題となっているが、その天井の｢ありよう｣を決めているのは意匠設計者であるということをまず自覚する必要がある。内装意匠の一部を設計する…という感覚では安全は守れない。意匠設計者は高所・頭上にある天井の重さを常に感じとりながら設計に取り組む必要がある。

人命保護の観点からは｢3.1.1　安全性評価法｣で示された安全性評価法を用いて、まずは天井高さと天井材の組み合わせを検討する。

機能維持については、本ガイドラインに示されている様々な観点や設計方法、提案、事例などを参考にしながら取り組んで頂きたい。

2. 意匠設計者は総合的にものを考える設計者

本節で、意匠設計者と書いてのは、構造設計者、設備設計者に対応する意匠…ということであり、意匠設計者は本来、意匠でだけではなく総合的立場（※1）の設計者である。設計全体を統括する立場から、総合的安全性も設計しているという自覚が必要である。

設計が大規模化・高度化し、発注者の要望も多様化すると、分業して対応せざるを得ない。分業することで各々の技量を最大限に発揮しやすいというメリットがある一方で、

- タテ割りによってすきまから抜け落ちてしまう大事なことがある
- 意匠、構造、設備のコミュニケーション不足になりやすい
- 発注者との合意形成に支障が出てくる

といった課題もある。意匠設計者が意匠のみに専念していると、これらの課題は解決されない。

天井には、天井として見えている面と、隠れて見えないが室内空間を様々にサポートしている設備機器類、天井材や設備重量物の懸垂、上部の床や屋根、建物全体を支える主要構造部など含めると様々なエンジニアリングが塊となって存在している。近年の天井落下事故を奇禍として、意匠設計者が総合的安全性の設計者として設計チーム全体を統括していく立場であるということを再度見直す必要があり、それを啓発していく必要がある。

※1 建築士法第 25 条の規定に基づき、設計（工事監理等を含む）の業務報酬の基準の改定が 2009 年、告示 15 号で定められた。設計は工事監理等とともに「総合」、「構造」、「設備」に分類されている。中で「「総合」とは、建築物の意匠に関する設計並びに意匠、構造及び設備に関する設計をとりまとめる設計…」と定義されている。

3. 従来の天井の設計における反省点

2011 東日本大震災を契機に少しずつ設計者の意識が変わってきているが、従来の反省点を以下にまとめる。また、今後どのように意識を変えていくのか、またそのためにどのような課題が横たわっているかについても言及する。

(1) 仕様書、仕上表で設計してきた

天井に関しては、使える材料や工法が比較的狭い範囲に限定されているとの思い込みがある。例えば天井材に関しては、石こうボード系、ロックウール吸音板、ケイ酸カルシウム板系、金属系等に限られて発想されている場合が多い。内装制限等の法規や天井工法を含め調達に有利な規格品などの関係から、例えば床材などに比べて選択範囲は確かに狭かった。天井については他の部位とは異なり、建物利用者は遠目で眺めるだけで、材料を肌で感じることがないために、結果的に種類が少ないのではないか。

このことは「天井材を選ぶ」、「工法を選ぶ」という手慣れたやり方を経て、仕様書・仕上表に表現するだけという設計を助長してきた。設計事務所のほとんどは、天井材料をいわば凡例的に扱えるように作図のマニュアル化を進めている。合理的であるが、画一化や「考えない」意匠設計者を育ててしまうという負の側面もある。

天井伏図は、断面図以外で天井が描かれる唯一の図面である。段差や折上げ、間接照明等の意匠を施す場合を除くと、設備設計者に比べて関心が薄くなりがちでもある。

また、天井材の吊り方や水平振れ止めについてはきちんと設計していない、もしくは仕様書のみで表現、またダクトや配管、設備機器との整合性について十分な検討がなされていない例も多かった。「あとは施工者にお任せ」という設計者も多い。設備機器等の詳細レイアウト等の進み具合と、意匠設計図書の進み具合の不整合も要因の一つである。

安全性確保の点からも腕を振るってしかも慎重に設計されるべき天井の設計が、半ばルーチン化した安易ともいえる方法で行われてきたことは大いに反省すべき点である。天井

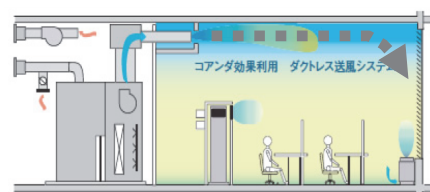
に関する設計図書のあり方、作成方法などは今後の課題である。

既存の汎用的な天井工法のみに依存しない自由な発想を常に持ち続けることも大切である。天井から重量物を極力排除し最小化した殆どモノがない直天井の事例を紹介する（図 5.1.1）。天井には音に関して吸音や反射、照明器具の保持、空調機器やダクトの隠蔽、排煙設備の保持などの機能があるが、それらを一から見直し、技術的・工学的取組みを経て成就したデザインである。

居住域の半分をスラブ表し、残りの半分を吸音性のあるボード貼りとしている。同じ研究グループ内では音が上のスラブで適度に反射することでコミュニケーションを促し、他の研究グループ間では互いにプライバシー保持のため吸音ボードで吸音、隣のグループからの音を伝わりにくくしている。

上部にある照明（アンビエント照明）を最小限にし、建築的にしつらえた書棚等の家具から上方に向けて照らすことで（タスク照明）、頭上が面として明るく室内の明るさ感に寄与している。

空調に関してはダクトを用いない方式。気流などの流体には平滑な面に付着する特性“コアンダ効果”があり、フラットスラブに空調空気を付着させて搬送する方式とした（※2）。排煙については、避難安全に支障がないことを性能設計により確かめ、排煙設備を設けていない。天井内の設備類の一掃に寄与している（※3）。

低階高でありながら室内高さの確保、送風動力の削減、低コスト化を図ることができた。

※2
平滑なフラットスラブに，気流が貼り付いて遠方まで運ばれることで、搬送用のダクトを不要にする。

※3
階避難安全検証法を用いて各居室から階段にいたるまでの間、避難上支障ある高さまで煙が降下しないことを確かめることにより、排煙設備を設けていない

図 5.1.1　頭上にほとんどモノがない研究室

(2) 天井懐へのしわ寄せ

天井懐は、

・集団規定（特に建物高さに関する規定）と発注者からの要望である床面積の最大化

・天井高さの確保
・建設コスト低減
の面から、「低階高で高天井」実現を目指すことが多く、そのためにしわ寄せを受けやすい。小さくなった天井フトコロでは
・梁せいやスラブ厚さ
・設備機器やダクト類
・天井の懸垂や水平振れ止め
で納まり等で苦労することが多い。

不十分な検討で「低階高で高天井」を目指す場合、結果的に天井懐内が立体パズルを解くようなことになり、天井の吊り材や補強材が健全な形で実施されにくくなる。この立体パズルを施工者が解くようなことにもなりかねない。このことは意匠設計者のみが非難されるべきではなく、発注、設計、監理、施工、運用、使用等に関わるすべての関係者にとっての課題である。

なお、天井懐内の計画・設計は 3 次元 CAD 等を活用することによって、
・適切な設備機器やダクト・配管の配置
・天井の懸垂や水平振れ止めと上記の設備類との取り合い
などの検討をスムーズかつ確実に行うことが可能になる。また、施工者への確実な伝達に寄与させることもできるので是非活用したい(3.2.5 節参照)。

(3) 法令等を順守するのみであった

発注者が要求する耐震、免震、制震、津波からの避難安全性、また法令等に規定される構造強度や避難安全性、耐火性、昇降機の安全性、消防・消火活動支援などについては設計者の意識にのぼりやすい。一方、以下の
・発注者の関心があまり働かないが、安全確保の上で重要な分野
・法令等に規定されていない分野、または法令等に規定されていてもあまり実効性のないもの（※4）
・法令等が規定している以上の安全性
に関して、設計者がこれまで十分注意を払ってきたとは言い難い。法令、基準（指針）、マニュアルさえ守ればよい…というということでなく、設計者は発注者の要求や法令上の規定の有無に拘らず、建物の安全性に気を配らなければならない。法令は最低限の安全水準であることも再認識したい。

発注者や法令等の要求する事項以外の安全性について、その注意を喚起する興味深い試みがある。国土技術政策総合研究所が HP 上で公開している「建物事故予防ナレッジベース」（※5）は、日常生活において建物内やその周辺で起こる転倒、転落、落下、落下物による危害などの実際に起きた事故事例や対策を集めたものである。意匠設計者が率先して読む

べき内容がほとんどである。なお、天井の落下による被害については16事例が報告されている（いずれも非地震時の落下の事例である）。

※4　建築基準法施行令　第三十九条（屋根ふき材等の緊結）では、「屋根ふき材、内装材、外装材、帳壁等は風圧並びに地震その他の震動及び衝撃によって脱落しないようにしなければならない」と書かれている。あるべき姿を規定されたに留まるため、これを真剣に守ろうとする意識になりにくい。

※5　建物事故予防ナレッジベース

http://www.tatemonojikoyobo.nilim.go.jp/kjkb/

(4) テナントの内装設計など

オフィスビルや商業ビルなどでは、内装をテナントが主体的に設計する場合も多い。天井は排煙設備やスプリンクラー、非常照明、誘導灯など法的な必要な設備等があるため、いったんオーナー工事として天井を完成させ、そのあとテナントが乗り込んで変更するといったケースも多い。テナントの営業上必要な設備などが加わってくるケースもある。テナントは、内装は什器と同じく彼らの自由になる範囲…と考えやすい。彼らに天井落下の危険性や落下防止策などを理解してもらうことは重要である。

テナント工事以外でも、ホテル・商業ビル・複合施設の共用部分について建物本体の設計者と異なるインテリア設計者が天井を含めた内装の設計を行う場合がある。

以上のように建物本体の設計者とは別の設計者に引き渡すもしくは連携して内装の設計をするような場合、天井の落下防止に関して一層の注意が必要になってくる。意匠設計者は、意匠、構造、設備の間の総合（コーディネーション）に加え、テナントなど別の立場のインテリア設計者やテナントの設備設計者・施工者に対しても総合的立場でなければならない。人命保護の大切さや天井落下事故を防ぐために必要な事項を伝えることに加え、責任分界点を明示し、各関係者が自らの責任と良心において取り組んでいくことを促していきたい。

発注者、関係者の啓発も意匠設計者の役目である。

4. まとめ

意匠設計者は、建築物の総合的安全性を統括する立場であることを自覚しなくてはならない。このような意匠設計者の自覚とその啓発が現状は極端に遅れている。天井落下被害防止は天井の軽量化・柔軟化、直天井化などを意匠設計者が意識するだけで非常に容易になる。さらにこのことを念頭に置けば、天井等の非構造材を含む新しいデザインに取り組むことができる。さらに軽量・柔軟な天井材の開発などを材料メーカーに働きかけ、開発に関与していく積極性も必要である。そのためには、意匠設計者の啓発が非常に重要である。

5.2　隠れた被害の認識

　大きな地震など災害が発生したあとで「被害なし」となった建物にも潜在化した損傷被害が蓄積している可能性がある。

1.　災害発生後の被害の確認状況

　設計者及び施工者側では震災等災害の際には初動期に状況確認ための対策本部を設置し、第 1 段階(情報収集と共有化)として発注者側へ連絡時期を考慮しながら安否確認と建物の被害状況確認を行い、データを共有化する。被害状況の多くは目視での確認ではあるが、概ね照会先は建物を管理する部署なので比較的詳細な情報が入手可能で、「被害無し」という場合はひとまず、対応の優先順位が下位に下がる。その後、第 2 段階（被害への対応）として状況が安定した時期から、現地確認の訪問の可否、被害調査の案内をおこなっている。何らかの被害があった場合は、建物管理者側と復旧あるいは改修に向けての動きが可能であるが、一旦、「被害無し」と報告にあった物件は先方からの何らかの依頼がその後、無い場合が多い。以下に紹介する事例はその「被害無し」の建物の一つである。

2.　潜在化した被災事例～本当は問題がある「被害なし」

　ここで紹介している写真は「建物被害なし」と報告のあった事例で、震災後に改めて耐震診断を依頼されて、その点検のため調査に入った事例である（図 5.2.1～5.2.6)。

図 5.2.1　室内側天井見上げ「被害なし」の状況

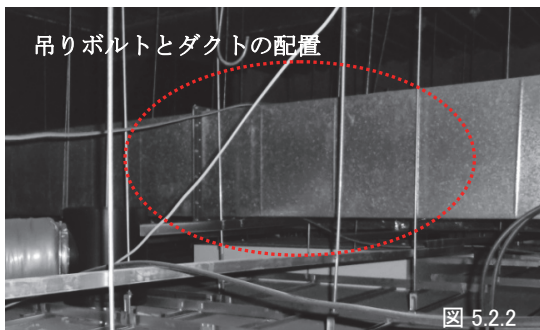



図 5.2.2

図 5.2.3

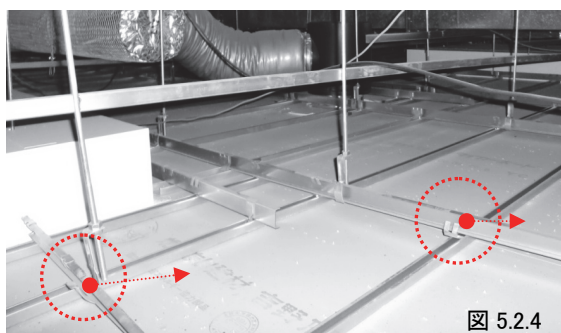



図 5.2.4

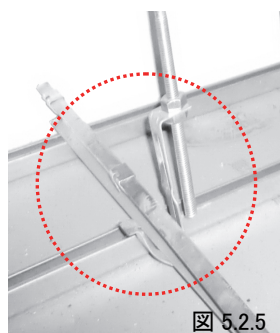



図 5.2.5

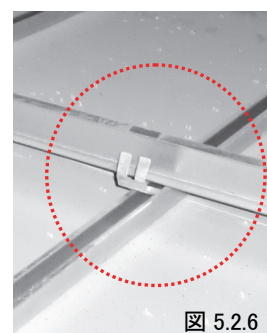



図 5.2.6

この地域の震度は５強であったが､室内側は､｢被害なし｣の状況である（図 5.2.1 参照）。天井は在来天井工法で天井面に段差もあるが、天井材のクラックや一部落下もなく健全な状況である。ところが、点検口から中を確認すると震災の振動によって、ハンガーやクリップが開いたり、野縁が変形したりしているのが見受けられ、何とか脱落せずに維持している状況である。再度、大きな地震に見舞われれば落下の危険性が高いことが伺われる。また、天井内の設備機器と天井下地の吊りボルトの近接というクリアランス上の問題等、配置上の課題も確認できた（図 5.2.2〜6 参照)。

これらは、もし、ある程度の被害が生じていれば、詳細な被害調査が入り、指摘を受け、かつ改修される項目ばかりである。この物件の場合は、幸いにも改修の提案をすることができたが、それでも震災後一定期間が経ってからのことである。｢被害なし｣という判断で見過ごされている場合、今後の地震の場合だけでなく、震災と関連付けが難しい平時の段階で落下事故が生じる可能性も示唆される。このような震災後状況がある背景には；

・室内側への落下や損傷被害がないため、目視のみ、確認可能な範囲のみの一時的な調査で終了していて、使用を再開している。また、復旧時間の短縮化、省コストから詳細な建物診断がされていないか、後回しとなっている。
・建設地が遠方で交通事情の便の関係から設計者、施工者等の適時の確認が難しい。
・竣工から相当の年月が経過し、設計者、施工者等が介在する機会が少ない。

等々さまざまな理由あると考えられる。一度、｢被害なし｣との報告を受けた建物にあえて詳細な調査や診断を促すのは難しいため、何らかの判断基準が必要と考えられる。

3. ｢被害なし｣に対する建物関係者への啓発

今回のガイドラインでは、地震時だけでなく非地震時の場合の対処についても想定している。震災復旧・改修時の対応について評価方法と発注者との合意形成及び工法の選択手順についてそれぞれ言及しているが、この｢被害なし｣の状況で潜在化してしまっているリスクに対してどの様に発注者や建物管理者側にアプローチするかは重要な課題である。それについて既に震災後、時間が経過した段階での将来の地震や非地震時での災害回避について｢3.5　既存建物の改修｣の冒頭に触れられている状況の説明と改修方法の提示がされ

ている。この課題の啓発にもガイドラインを活用してもらいたい。

震災直後の初動期では、被害状況確認を目視により判断する。この際に天井点検口が効率のよい判断のために配置されているだろうか。意匠面重視あるいは設備保守のみで考慮されているのではないだろうか。この点のみならず設計時から施工段階までにわたり、意匠設計者および設備設計者、施工者双方が調整すべき多くの課題があり、東日本震災震災被害から得られた知見を適切にフィードバックする必要がある。この課題の認識についてもガイドラインの「3.3　設計の進め方」、「3.4　関係者の役割」等を活用してもらいたい。

5.3　原状復旧と様々な課題

1. 復旧の実態と様々な課題

災害後の復旧では、安易な「原状復旧」の選択ではなく、確実な人命保護と必要な機能維持性能等の見直しを行い、それらを向上させることすなわち「復旧から改修」への移行が必要である。旧態依然とした行政慣行の改善が望まれる。

(1) 震災復旧状況の実態～ほとんどが原状復旧

本特別調査委員会では参加する各社から天井被害の状況を純粋にデータとして抽出しており、巻末に付録としてまとめられている。その中の復旧方法の状況と復旧方法の内容についての分析では、震災被害からの復旧方法の内、ほぼ半数が「原状復旧」であった。また、同様にほぼ半数が何らかの「耐震性を考慮した復旧」となっており、原状復旧せずに「全く天井を張らない」選択をした事例もあった。

その「耐震性を考慮した復旧」の内容をみると少数ではあるが、損傷制御を考慮した耐震天井化や天井材の軽量化を図る例もある。しかし、ほとんどの事例は、いわゆる「技術的助言」をベースとした復旧であり、その内容には「ブレースのみの補強」、「クリアランスの確保のみ」の単体の対策や「ブレースと吊り金物材の補強」といった複合の補強対策方法があるなど、対策の採用にバラつきが生じていることが見受けられる。技術的助言に準じて「ブレース、クリアランスを確保」で復旧されている事例もあるが、天井内の状況により、技術的助言通りに施工ができない事例や根拠があいまいなまま採用可能な補強方法のみの施工している事例も存在している。

仮に技術的助言を正としても実際に施工されている「耐震性を考慮した復旧」の内容は、原状復旧とさほど違いが生じないことを考えると復旧の実態としては、ほぼ 9 割近くが原状復旧と同等という状況であった。

(2) 民間施設の「原状復旧」の課題

原状復旧の際には、民間施設の場合と公共施設の場合で事情が異なるのでここでは、それぞれの課題について述べる。

①原状復旧と震災被害の繰り返しの関係

民間施設の場合、BCP の観点からも短時間復旧が優先されてきた。復旧の際にその判断として引合いに出されるのが、国交省の「技術的助言（H13 年～17 年)」である。(1)と同様に委員会のアンケートのデータから被害のあった建物の竣工年と「技術的助言」の関係をみると「技術的助言」の発出後にも相当数の被害が生じている。また、(1)でも触れたが原状復旧の際の耐震補強方法の採用にも複数のパターンが存在し、参照している「技術的助言」への理解にバラつきがあることがわかる。本特別調査委員会のデータの対象の多くが民間施設であることから、民間施設の「原状復旧」にはこのように正しく参照できる「基準」が無いために被害が繰り返されるという実態が生じていると判断できる。

②法制度及び税制度上の課題；原状復旧を容認する制度

以下の様に「原状復旧」を肯定し、促すための法的制度という課題がある。建築基準法に関連する課題と税法上の課題である。これら何れも復旧の際に、申請上の日程スケジュール、費用コストに直結する課題であり、結果として発注者が「原状復旧」を選択することを促していると考えられる。

【課題①；原状復旧は確認申請が不要】

原状復旧の場合は、主要構造の変更に当たらないため、確認申請等は不要である。被害のあった建物の多くは、いわゆる既存不適格の状況のため、復旧時に既存遡及が生じる様な復旧方法（(主要構造の変更を伴う工法)＝改修工事）はもともと採用されない傾向がある。また、震災復旧の場合、破損した建築物の応急の修繕については、<u>災害により破損した被災部分の修繕の範囲であれば</u>工事着手時期に係らず、建築基準法の規定が適用されない通達がある。

【課題②；原状復旧は税法上優遇される】

原状復旧は、法人税上で「修繕費」（経費、損金）として計上できる。その際に被災防止のための耐震補強工事についても同様に「修繕費」として扱うことができる。しかし、これはあくまでも<u>被災部分のみが対象</u>である。これ以外の非被災部分を同様に耐震性能を向上させる補強工事を行った場合は、＋αの機能が付加されたことにより、「資本的支出」（固定資産増）となる。

【課題③；原状復旧は地震保険の適用の前提条件】

地震保険は契約の前提である「原状」に対して被災度合の評価であるので、原状復旧以上の前提はない。当然のことながら、これも被災部分が対象である。

(3) 公共施設の「原状復旧」の課題

①「官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説（H8 年度版)」という基準

公共施設の場合もほとんどが原状復旧であり、耐震性能を向上したとしても原状復旧+α（金物補強程度）を採用というレベルにとどまっている。それに至る理由としては、

公共施設設計の計画基準である「官庁施設の総合耐震計画基準」の仕様が前提という点によるところが大きい。つまり、「原状復旧」とは「官庁施設の総合耐震計画基準」によって決められた当初の仕様に戻すことである。明確な基準のない民間施設と比べて、公共施設における「原状復旧」の内容は、同等ではなく比較が難しいが、総合耐震計画基準自体の詳細内容記述はH8年度版以降出ていないため（改定が加わり、H19年版が最新であるが）例えば、今回の東日本大震災で得られた知見である長周期地震動への対応や免震構造や制震構造における非構造部材、建築設備への対応が明確になっていない。仕様規定を守ってさえいれば、真の安全が実現されなくとも責任が回避できるという旧態依然とした許認可的な行政システムは、抜本的に改革される必要がある。

②法制度上の課題

民間施設とは異なり、従前以上の復旧が可能な「改良復旧事業制度」が用意されていたり、前述の税法上の問題は、生じないと考えられるが「原状復旧ありきの前提」の考え方や建築基準法適合の問題は民間施設と同様である。

3. まとめ：原状復旧からの脱却～「復旧から改修」へ

「原状復旧」の根底にあるのは、災害後の建物の内、被災した部分としていない部分に分け、被災した部分のみを速やかに復旧するという考え方であり、法制度や財政支援の制度もそれに便宜を図ることを意図して整備されている。その結果、被災した部分以外は改善されず、震災等を繰り返し経験しても同様な事故の再発を繰り返すことになっている。

一方、被災した部分の機能や性能を「原状復旧」以上に向上し改善することが「改修」である。今回の東日本大震災では、少数であるが、BCP を考慮し、独自の基準を改めたり、「準構造」の採用など安全性を高め、天井落下を根本的に防止するための方法の採用をする「改修」事例も増加してきてはいる(図 5.3.1)。

(a)被災したエントランスホール

(b)膜天井への改修で被災３ヶ月後に再オープンした

図 5.3.1　2011 年東日本大震災で被災した日本科学未来館の膜天井での改修事例

再度、初期の計画段階に戻り、人命保護を原則として、機能維持の評価から耐震性能等の見直しを行い、性能を向上させる方向へと向かうことすなわち、「復旧から改修」への移行が必要であり、そのための法及び税制度等の整備が望まれる。こういった方針へいかに促していくことも課題のひとつである。

参考文献

1) 日本建築学会：非構造材の安全性評価及び落下事故防止に関する特別調査委員会、東日本大震災における天井被害データベース、平成 24 年 2 月 22 日
2) 建設大臣官房官庁営繕部監修，社団法人公共建築協会編集：官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説、平成 8 年度
3) 国土交通省：「芸予地震被害調査報告の送付について（技術的助言）」国住指 357 号、平成 13 年 6 月 1 日
4) 国土交通省：「大規模空間を持つ建築物の天井の崩落対策について（技術的助言）」国住指 2402 号、平成 15 年 10 月 15 日
5) 国土交通省：「地震時における天井の崩落対策の徹底について（技術的助言）国住指 1427 号、平成 17 年 8 月 26 日
6) 国土交通省：「災害により破損した建築物の応急の修繕に係る建築基準法の取扱いについて」国住指第 27 号、平成 23 年 4 月 5 日
7) 国税庁 HP：税について調べる/法令解釈通達/基本通達・法人税法/第 8 節基本的支出と修繕費
http://www.nta.go.jp/shiraberu/zeiho-kaishaku/tsutatsu/kihon/hojin/07/07_08.htm
8) 国税庁 HP：東日本大震災関連の国税庁からのお知らせ/災害に関する法人税、消費税…の取り扱い http://www.nta.go.jp/sonota/sonota/osirase/data/h23/jishin/

5.4　設備の課題

天井懐内やその周辺に設置される設備機器は、建築計画段階から耐震その他の損傷制御に配慮した納まりとし、設備機器の脱落が人命に影響を及ぼさないようにする。設備機器が天井やその下地と互いに干渉し損傷落下が発生することのないように対策を講ずる。

設備計画は建築設計者が計画段階からしっかり考えていくことが不可欠である。また、設備関係者は既往の設備関係の技術指針にとらわれることなく、人体耐性評価に基づく安全性評価の観点から人命保護を最優先に考慮した設計、施工を行っていく必要がある。

1. 建築と設備の不整合

有効率優先でPS、DSが極端に少なかったり、各階で位置がずれていたりする建築計画が先行し、設備設計者に無理を強いる意匠設計者が多い。それでも階高が十分取れていればいいのだが、更に大梁底にやっと天井が納まる程度の階高しかとれていない場合が多い。意匠設計者が計画当初から設備のメインダクトやメイン配管ルートに配慮した建築計画を立案することが必要であり、このような計画を実行することで将来的なメンテも容易となり、人命保護の確保ができる天井を作ることが可能となる。

2. 設備の耐震設計・施工の課題

設備の耐震設計については、一般に既往の技術指針（注1）に則って設計、施工されている。しかしながらこの技術指針の適用範囲には以下の対象外とされているものがあり、人体耐性上の観点が不足している。

(1) 重量1kN 以下の設備機器

「重量1kN以下の軽量な機器の据え付け取り付けについては軽量であることを考慮し、機器メーカーの指定する方法で確実に行えばよいものとする」となっている。現在多用されている天井吊りのパッケージエアコン、天井内全熱交換機などが 1kN 以下であり、これらの機器は対象外となっている。更に、機器メーカーの指定する工法は実際には示されておらず、吊りボルトで吊られているだけの場合が多い。

(2) 配管類

配管類の耐震支持の適用範囲では「配管は50A以下、及び吊り長さ平均30cm以下、周長1m以下のダクト、82φ以下の単独電線管、周長80cm以下の電気配線」などが適用を除外されている。設備を支持する吊りボルトについては、激しい振幅を与えると容易に破断することが知られている。上記の適用範囲外である 50A の配管は直径 60.5mm で肉厚により 53～73N/m の重量がある。この配管の支持ピッチは同指針によれば3m以下となり、万一吊りボルトが破断すると3mの長さで160～220Nの配管が落下してくることとなり、致命傷を与える危険性があることは明白である。

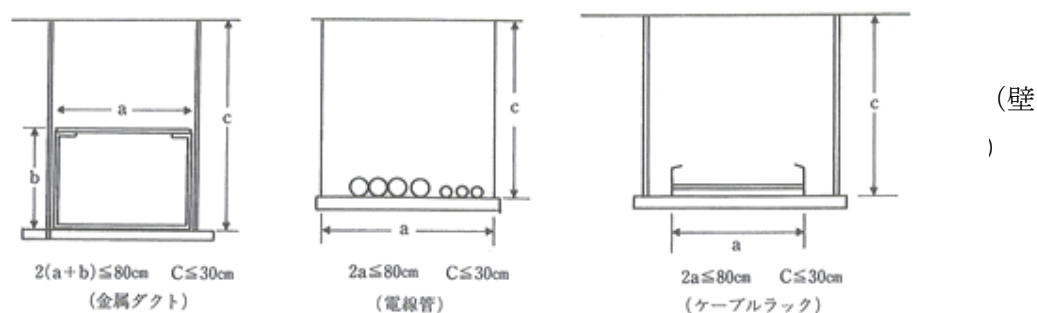



図 5.4.1　電気配線の耐震支持適用除外例（建築設備耐震設計・施工指針より）

(3) 管軸方向の耐震方法

同指針には配管、ケーブルラックなどの管軸方向の耐震支持方法が示されていない。設備配管は熱伸びによる固定の難しさもあるが、これらの設備は平面的にも断面的にも直線的に納まるものは少なく、複雑に曲りくねり、全体的な耐震性確保が難しい。更に、壁との取り合い、特に防火区画壁を貫通する場合にはクリアランスを設けることもできず、地震時に設備類の揺れで壁の損傷、倒壊、更に天井の崩壊に繋がる危険性がある。図 5.4.2 のような対処の方法があるが、手間とコストがかかり、対応されている例はごく少数である。

(4) 変位量

同指針では耐震クラス分けされた配管等の支持仕様を選択することとなっているが、それぞれのクラスに応じた最大変位量が示されていない。配管類のサイズが多様なことと組み合わせも無限にあることなど考えると一律に定義することが難しく、支持された設備と天井下地との衝突を避けるためのクリアランス寸法は勘に頼らざるを得ないのが現状である。

3. 上述のような未解決の問題を残しながら、構造設計を専門としない設備設計者だけで技術指針を頼りに設計しているのが現状である。今後は設備の耐震安全性を設備設計者だけに押し付けることなく、建築設計者、構造設計者がバックアップすると同時に、学識経験者等による技術指針の改定が望まれる。

4. 発注が分離される設備

設備工事の発注において、工場のプラント設備、飲食を含む商業施設などのテナントの設備工事は分離発注されるケースが少なくない。構造設計者は構造的な与条件だけをもら

って構造設計するか、テナント設計者などに荷重条件だけを与えてテナント工事の設計を任せるかである。脱落防止、損傷防止に関する基本的な考え方を伝えることはほとんどされていない。

また、共通吊り部材とも呼ばれる設備専用のぶどう棚があるが、可能な積載荷重の表記がない場合が多く、特に設備の改修時に想定荷重を超える機器や配管類が設置される場合がある。この為、地震時にぶどう棚を固定するアンカーボルトが抜けたり、全ねじボルトが破断したりする事故が起きている。このような部材の取付けは構造設計者の目の届かないところで工事が進んでしまう場合もあり、安易にあと施工アンカーが使われることも多く危険性が非常に高い。

設計者は発注者または所有者に対し総合的な人命確保のための基本的な考え方をきちんと伝達し、竣工時には最終的な安全性の確認を行うことが重要である。また、建物所有者が建物の使用期間中、継続的に人命保護を維持していくことができるように、設計意図を伝達することが、更に重要である。

5. 有効効率と施工性の優先

ビルマルチ方式の空調、天井吊りのパッケージエアコンが全盛であることは先に述べたが、これは空調機械の設置スペースを面積カウントされない天井裏に置くという、有効効率の非常に良いシステムである。その分50kgもある空調機が頭上に多数設置されており、非常時には大変な事故になりうる危険性を秘めている。

図 5.4.3

天井吊りパッケージエアコン

また、効率優先でPS, DSが平面的に片隅の最小限スペースに押し込められ、そこから室内に取り出される配管、ダクトは立体パズルを解くような難しい納まりとなり、耐震性確保が非常に難しくなっていることがよく見受けられる。人命保護を前提とした設備計画は建築計画から考えていくことが不可欠である。

施工面からみると、図 5.4.3 の写真にあるフレキシブルダクトは適切な長さであるが、設備の施工者によっては長さの検討をせずに、有り余る長さのフレキシブルダクトを現場に持ち込み、そのまま施工して余ったダクトを天井材の上にとぐろを巻いた状態で放置しているような場合もある。スプリンクラー配管とスプリンクラーヘッドをつなぐフレキシブル継手も同様で、配管が天井吊りボルトなどに接触して折角の自在性が損なわれていることもある。設計段階だけでなく、設計意図を理解した厳格な施工管理、工事監理が求められているのである。

6. 建築計画からみた安全な設備計画

天井内設備もまた「軽く、柔らかく」を原則とし、軽量化を図るとともに、重量のあるものはできるだけ床面、または床下に設置するようにし、天井内には必要最小限の設備を配置することが最も安全である。その為には建築の計画段階から天井裏の設備に配慮した建築計画をする必要がある。以下にその事例を示す。

(1) 設備の軽量化促進

天井内設備の軽量化を図ることも人命保護には非常に有効である。たとえば、空調用ダクトに段ボール製ダクトを使用して軽量化を図る方法がある。高性能段ボール製超軽量ダクトは軽量で施工性もよく、断熱性にも優れた不燃性のものがいくつか開発されている。CO2 削減効果も高く期待される材料の一つであり、使用量が増加すればコスト的にも予算に合わせやすくなると思われる。

また、更に柔らかく軽量なダクトとして布製ダクトも使用例が増加してきており、今後に期待したい。

図 5.4.4　高性能段ボール製超軽量ダクト
（大成建設㈱、㈱栗本鐵工所、レンゴー㈱より提供）

図 5.4.5　布ダクト
（ソーラーウォール HP より）

図 5.4.6　布製ダクトの使用例　（中央 2 本の筒状のものが布製ダクト）

(2) フリーアクセス空調

一般的な空調は天井内にダクトを設け新鮮な空調空気を均一に天井面から吹き出す方式とするか、ビルマルチ方式で天井吊りパッケージ空調機を多数天井に設置して空調をしている。フリーアクセス空調はフリーアクセスの中に空調空気を流し、フリーアクセス表面に設けられた吹き出し口から空気を吹き出し、天井内をリターンチャンバーとして空気を空調機に返す方式である。空調機はアンダーブローの空調機となり、床置きとなる。フリーアクセス空調システムとすることで天井内のダクトを無くすことができる。また、下から吹き出すので空間全体を空調する必要がなく、人の居住域のみを空調することで省エネにも貢献する。劇場などでも客席の下部をサプライチャンバーとし、床面、または座席の背から空調空気を吹き出し、天井面などでリターンをとる方式がある。劇場のように大きな空間では人のいるエリアだけ快適な環境を作る居住域空調はより安全で大きな省エネ手法ともなる。

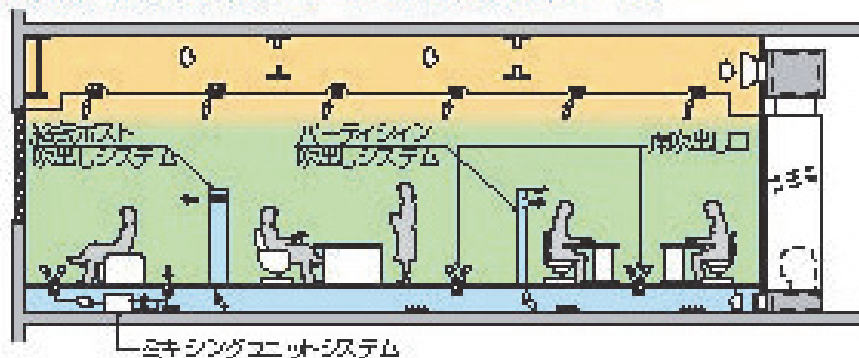



図 5.4.7　フリーアクセス空調（大林組技術資料より）

(3) ISS (Interstitial Space)

これは工場、研究所、病院など設備の多い施設に採用されるシステムで、設備スペースと人のスペースを断面的に完全に分離する手法である。図 5.4.8 に示すように設備を集約して専用のスペースを作り、設備、配管類は床上に配置する。特に階高の高い部屋を必要とする場合、人だけの動線となる廊下などは 2 層にして上部を設備スペースにすることで、安全性はもちろん、メンテナンス、設備の更新などが非常に容易になる優れたシステムである。

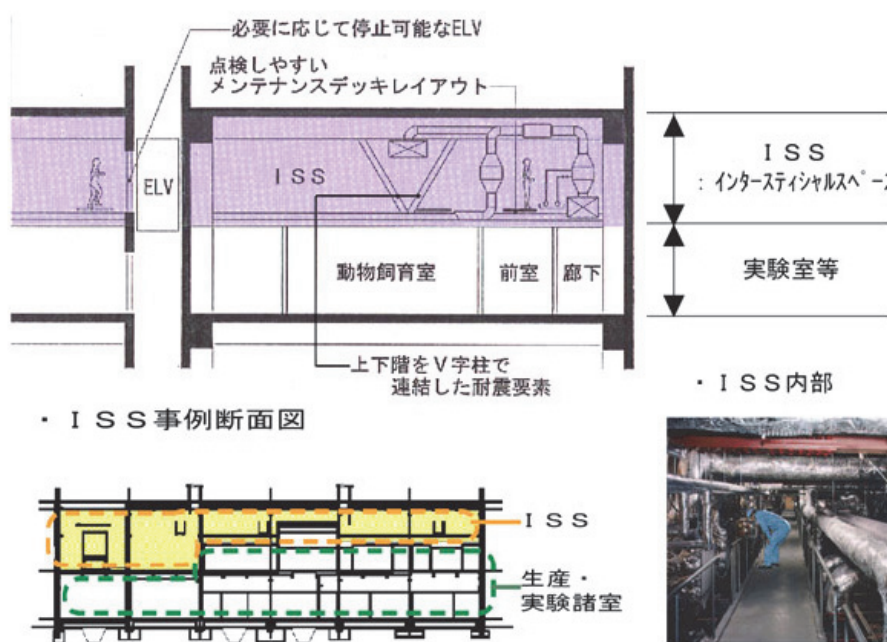



図 5.4.8　ISS
(清水建設　実績・技術ソリューションサイトより)

(注 1) 2005 年日本建築センター発行「建築設備耐震設計・施工指針」

参考文献

1)　日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針 2005 年版
2)　震災復興支援協議会「設備被害検討会」：東日本大震災による設備被害と耐震対策
3)　大林組フリーアクセス空調
4)　清水建設 HP

5.5　天井落下防止と火災安全性の両立について

軽量・柔軟な天井材を採用する時、防火関係の法規(内装制限)の関係で使用が難しい場面がある。法的に内装制限が要求されるかどうかにかかわらず、適用しなくてもよい建築基準法上の条件を明らかにし、さらに、「天井落下からの人命保護」と内装制限が目的とする「火災初期の避難安全性」の両立が可能であるかどうかの検討を行った事例について以下に紹介する。

大空間で可燃物が比較的少ない場合、ある高さ以上の天井は引火しにくいと考えられる。一定の安全性を検討・確認した上であれば、高さ方向で火災安全性と落下安全性の優先順位が入れ替わることが合理的かつ望ましい場合がある。

1. 内装制限とは

内装制限は、一定の条件下にある（特殊建築物、大規模建築物、避難経路、無窓居室、火気使用室など）建築物の居室や廊下などは、準不燃材料や不燃材料などで仕上げることを法令（建築基準法）で要求するものである。火災後の比較的早い段階で避難が順次行われる中で、避難上支障があるような有毒なガスや煙の発生を抑える目的である。この法規により、火災発生後、盛期火災になる前の段階で煙や有毒ガス等を吸引などすることによる死傷者は大幅に減った。

準不燃材料や不燃材料が規格品として安価に多く流通することとなった一方、内装制限が適用される室内では、結果的に選択できる天井材料はかなり限定されることにもなった。

また、準不燃材料や不燃材料は、その質量が大きくなりがちでもある。天井の軽量化・柔軟化への志向と相容れない悩ましいところである。

2. 内装制限が必要な場合でも適用されない建築基準法上の条件

なお、建築基準法で内装制限の対象であっても、以下の場合はその規定が適用されない。

（ア）　スプリンクラー設備、水噴霧消火設備、泡消火設備などで自動式のものおよび排煙設備を設けた建築物の部分（用途による）

（イ）階避難安全性能（または全館避難安全性能）が確かめられた階の各室

どちらかを満たせば天井材の選択が広がり、デザインの自由度を高めることも可能である。天井の軽量化・柔軟化等を図りながら、より自由なデザインに挑戦する可能性として認識しておきたい。

（イ）の場合注意しなければならないのは、無条件で内装材を選択できるということではないということ。内装材の燃えやすさをパラメータとして計算することであり（燃えや

すい内装は火災外力がおおきくなる)、計算の結果、準不燃材料や不燃材料を用いなくても設計できる場合もあれば、これらを使って火災成長率を低くしなければならないということもある。

（イ）に関して、展示空間を例に内装制限の差が階避難安全性能にどのように影響するかの計算例を載せる（図 5. 4. 1)。

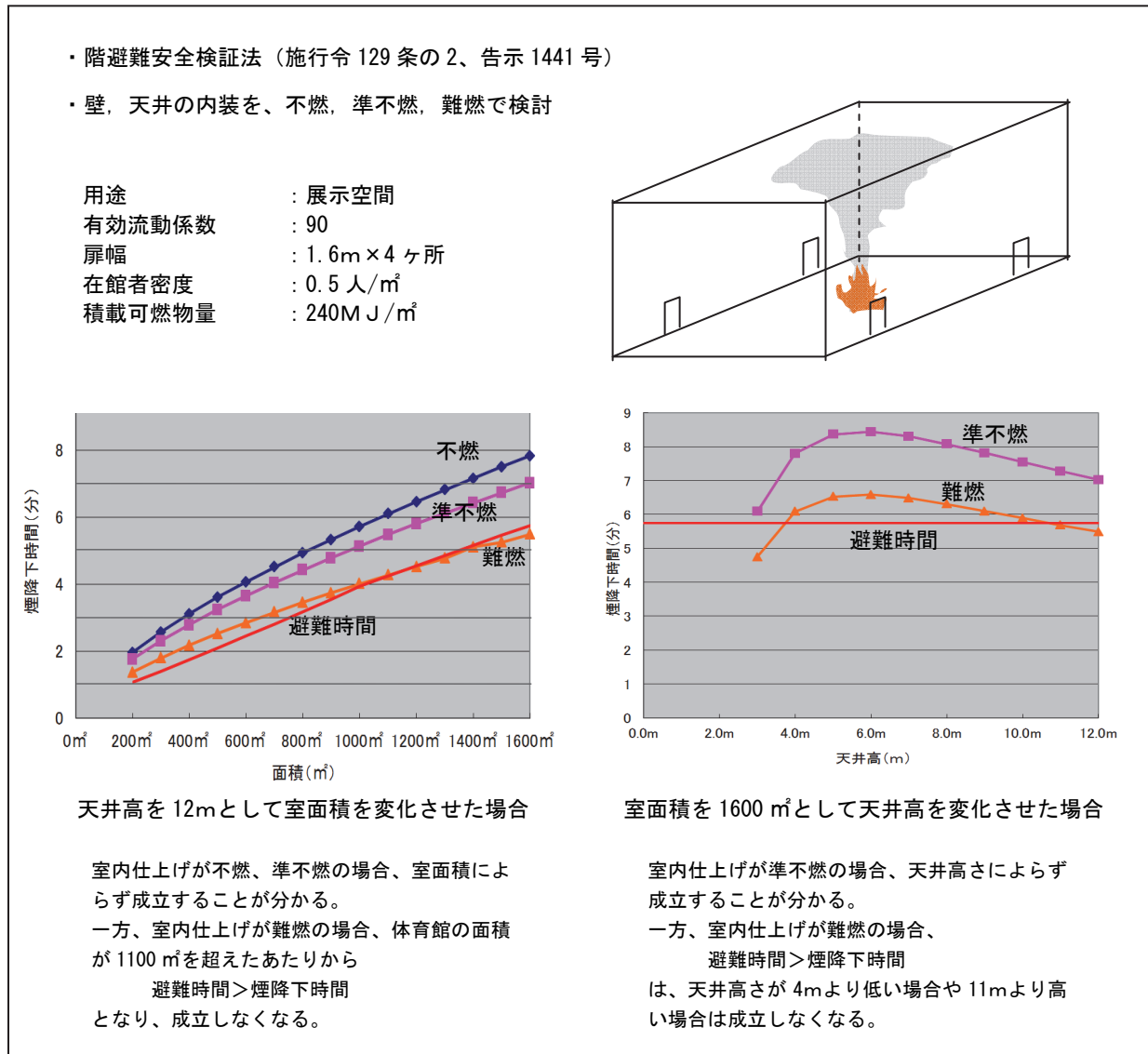



図 5.4.1　階避難安全性能を使って内装制限を適用しないことに関する検討

なお、階避難安全性能は当該階全体に適用され、ある特定の居室に対して適用することはできない仕組みとなっている。そのため、この手法を断念せざるを得ないケースも多い。既存の改修においては、この制度が規定された 2000 年より以前に建築確認されたものについては、現行法下で建築確認を再度経る場合を除いて適用することは原則できないことになっている。

3. 高天井の場合の内装制限について考える

(1) 不燃材料が頭部に落下した場合の最大衝撃荷重

同じ天井材が低い位置にあるか高い位置にあるかによって、落下した時への人体へのインパクトは異なることは、「3.1.1　安全性評価法」のところで詳しく述べられている。
実験結果から、例えば化粧石膏ボードの9.5ミリ厚は、頭上から4メートル以上の高さからの落下で、頭部への最大衝撃荷重は頭部に重大なダメージを与える可能性のある2000Nを超えることが報告されている（「図3.1.6　最大衝撃荷重による評価（5）最大衝撃荷重の観測結果（シリーズ5）を参照)。

事務室や普通の会議室など天井が高々3m程度の居室であれば、人命への影響は小さいが、大会議室や体育館など高い天井の場合は、化粧石膏ボードの落下は人命への影響が懸念される。

一方、化粧石膏ボードは不燃材料、準不燃材料として極めて広く使われる材料である。内装制限の遵守と天井落下からの人命保護の両立は、汎用性のある不燃材料等を使う場合には難しいことを実験結果は示している。

(2) 避難安全性と天井落下からの人命保護を両立は可能か

同じ安全性の確保といっても、内装制限が目的とする避難安全性と天井落下からの人命保護というまったく異なる事象を比較することは難しい。また、内装制限は原則、対象となる室の天井高さは無関係である。

そこで、体育館や大会議室など大空間でかつ可燃物量が比較的少なく天井がある程度高い場合に火災時の天井付近の温度がどの程度になるかシミュレーションによって予測してみた。室面積を1600㎡として、3000kWの発熱速度を持つ火災（※1）を前提として、天井高を変化させて天井付近の温度を非定常2層ゾーンモデル（※2）とCFD（※3）によって計算した（図5.4.2)。

非定常二層ゾーンモデルによる解析では、天井高さが7.5メートル以上になると天井付近の温度は200℃を下回るようになる。CFDによる解析では、少し温度が高めに推定され、天井高さが9メートル以上になると天井付近の温度は200℃を下回るようになる。

この結果をもとに、体育館や大会議室など可燃物が比較的少ない空間の場合、天井高さが9メートル以上であれば火災時の初期段階で天井付近の温度は200℃まで上昇することはないと言えるのではないか。木材の引火点が250～260℃であることを考えると、天井材に不燃材料や準不燃材料を用いなくても、少なくとも避難する間は天井に引火することは考えにくい。

天井が高くなればなるほど天井落下による危険性は高まるが、高天井では、

・火災時の天井への引火の危険性は低くなる

・火災時に煙の降下する時間が長くなり、煙が避難行動に支障を及ぼしにくい

天井高さ［m］	天井付近の温度の予測　［℃］		
	CFD	非定常二層ゾーンモデル	Alpert の実験式（※4）
3.0	608	500	583
4.5	446	340	307
6.0	286	230	197
7.5	247	170	142
9.0	194	140	110
12.0	159	110	76
15.0	125	80	59

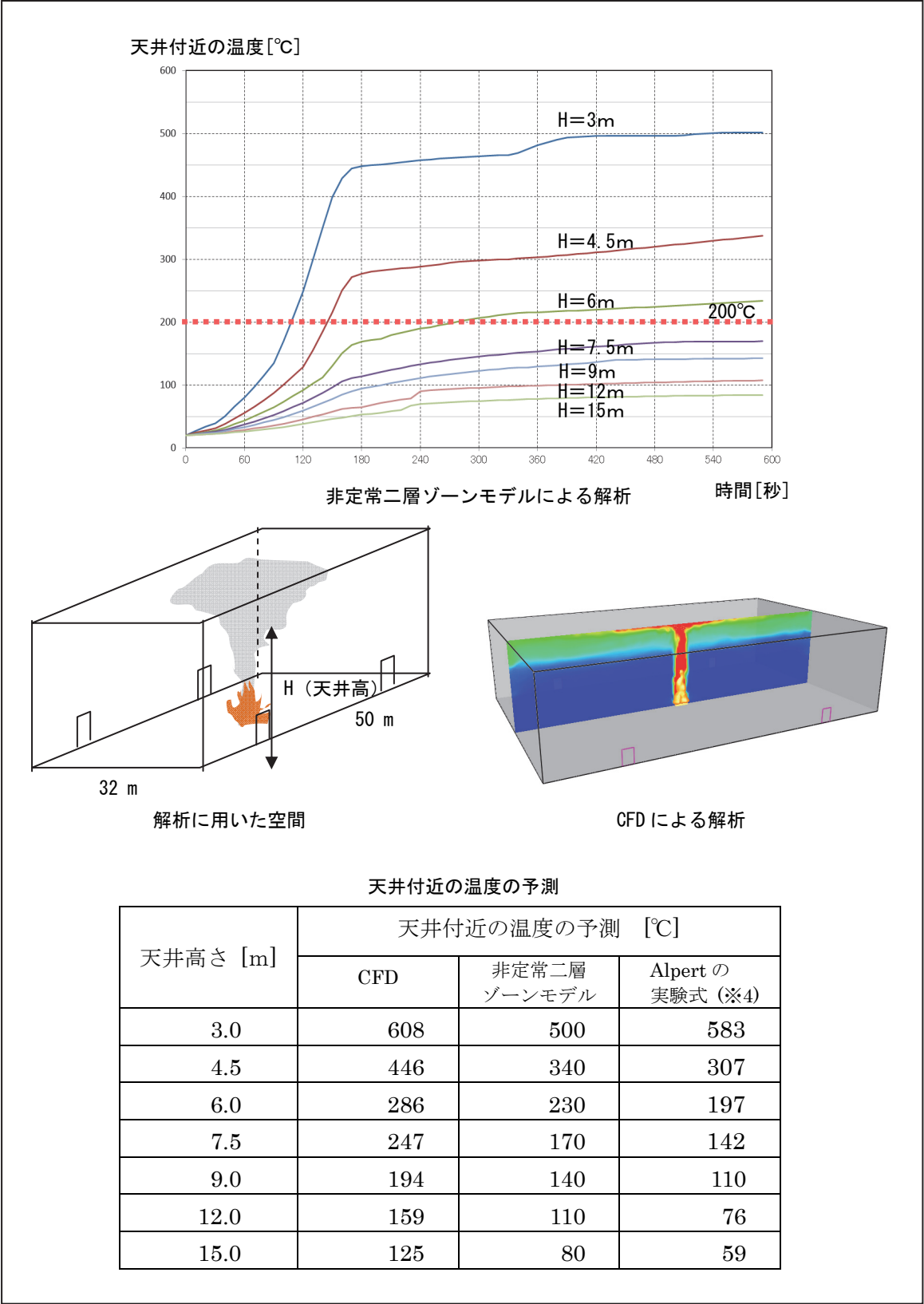



図 5.4.2　大空間、高天井での火災時の天井付近温度の予測

ことから、一定の安全性を検討した上であれば、必ずしも不燃材料や準不燃材料を用いないで天井を仕上げることが可能になる法整備への道が開かれることが望まれる。

なお、高温になることによって天井材の一部が溶けて発生する落滴等への懸念、また消防法の中で規定される防炎性能など、建築基準法と異なる観点からの慎重な検討も必要である。

大空間における天井材の選択の幅が広がることによって、新しい軽量な天井材や膜天井などの新しく先進的な試みや軽くて柔らかい天井材が多数生まれることに期待したい。

※1　ソファーが二つ同時に燃える火災にほぼ等しい

※2　火災発生時に、室内の高温である上層部と、低温である下層部の二層に分ける火災モデル。上層部と下層部はそれぞれ物理的・化学的性質に関して一様で明確に分離されていると仮定し，各層の温度や煙濃度などの非定常的変化を予測する手法。

※3　Computational Fluid Dynamics の略。計算流体力学と訳される。空間内を格子状のセル等に分割し、各セル間の熱移動や煙、放射などを逐次計算することで、火災の成長に伴う現象を予測することができる。

※4　Alpert が様々な火源を用いて調べた天井ジェットの温度をもとに導かれた式

$\Delta T = 16.9 \times (Q^{2/3} / H^{5/3})$　（Q：発熱速度[KW]、H：天井高さ[m]）

により算出。ΔT は上昇温度であり、室温の 20℃を加えた。

なお、周囲が開放された空間での実験がもとになっているため、閉鎖的空間に対して低めの温度になっている。

付録　東日本大震災における天井落下被害と復旧アンケート調査

1.　はじめに

2011 年 3 月に発生した東日本大震災では、地震動による構造被害は比較的軽微にとどまる一方で、膨大な数の建物で非構造材の被害が発生した。天井や照明などの吊物が落下してしまうと、利用者の安全を脅かすのみならず、避難所として利用することも困難になるなど、その社会的影響は甚大である。特に天井については被害事例も多く、一つの建物の中でも一旦落ち出すとその落下範囲が広範囲に及ぶ場合が多い。また、工場や倉庫などで天井が落ちると、復旧まで数か月かかる場合もあるなど、事業継続性の上でも大きな支障を来たすこととなる。

天井落下の危険性については 1970 年代から指摘されてきた[1)]。震度 5 弱以上の地震で落下し始めるとも言われており、近年発生した地震においてもほぼ毎年のように発生している。

地震時の天井落下ばかりが注目される傾向があるが、実は天井落下は地震のない平常時にも頻繁に発生していることが川口により指摘されている[2), 3)]。非地震時の天井落下は予兆もなく突然落下してくる場合も多いため、見方によってはむしろ地震時よりも危険であると言える。負傷者を出した重大事故も多数報告されている。

東日本大震災で多発した非構造材被害を受けて発足した本特別委員会の委員は、ゼネコン、設計事務所各社の実務者及び学識経験者より構成されている。本地震で起きた天井落下被害の傾向を分析するため、実務者委員の所属する民間企業各社の協力のもと、天井被害アンケートを実施した。各社が保有する被害事例を集計することで天井被害に関するデータベースを作成している。

本稿では、前半では東日本大震災の被害事例を中心に、地震時における天井落下被害の概要について述べる。後半ではアンケートに基づく今回の地震での天井被害分析結果の概要について説明する。

2.　地震時の被害

(1)　東日本大震災における被害

一般的に震度 5 弱以上となると天井材の落下現象が発生すると言われる[4)]。今回の震災では震度 5 弱以上の地域が極めて広範囲に渡ったため、その被害数もこれまでの地震とは桁違いであり、その全容は未だ明らかではない。2012 年 4 月の国土交通省のまとめによれば、少なくとも約 2000 の公共施設等で落下が確認され、5 人が死亡、72 人が負傷する被害があった（図 A.1～A,3)。多くの場所で最初の地震動のピークを迎えるまで 1 分以上かかっていたため、建物被害の甚大さに比較すれば人的被害は幸い少なかったと言える。しかし一方で、落下により使用が困難になり避難所の不足を招いたこと、ターミナル駅や空港等が被災して救援・復旧活動に支障をきたしたことなど、その社会的影響はこれまでになく大きなもので

あった。民間企業にとっても、自社の工場や倉庫、事務所ビルが被災することで事業継続が困難になるなど、企業経営上も大きな損失をもたらした。避難経路を塞ぐように落下するなど、深刻な 2 次被害を引き起こす危険性の高い事例も多数見受けられた（図 A.4）。また、後のアンケート結果でもわかるように、本震でダメージを受けた天井が余震で落下した例も多いので注意が必要である。

図 A.1　公共プールの天井落下被害
（東京大・川口研究室提供）

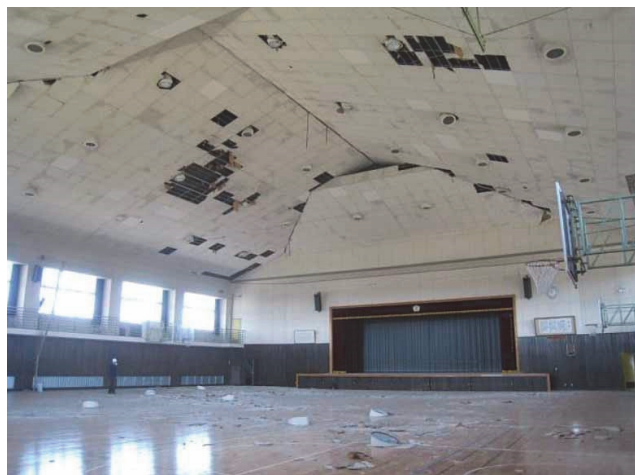



図 A.2　中学校体育館の天井落下被害
（東京大・川口研究室提供）

図 A.3　劇場型ホールの天井落下被害
（東京大・川口研究室提供）

図 A.4　展示場の天井落下被害
（東京大・川口研究室提供）

(2) 過去の地震における被害

地震による天井材の落下被害は過去の地震においても多数報告されており、古くは 1978 年に発生した伊豆大島近海で発生した地震において大きな被害があったことが報告されている [1)]。1995 年の阪神・淡路大震災においては、構造自体は健全でありながら、天井などの非構造材の落下被害により避難所として利用できない大規模施設が多数あったことが報告され [5)]、非構造材の被害が注目される契機となった。2003 年十勝沖地震では釧路空港のロビー吊り天井が 300m^2 に渡って崩落し、空港の一時閉鎖を余儀なくされた。また 2005 年 8 月に発生した宮城県沖地震では、公共プール吊天井が大部分に渡って落下し、30 名の負傷者を出すに至った。

表 A.1 は近年を中心に過去の地震における主な天井落下被害をまとめたものである。このように、地震による天井落下被害は、程度の差こそあれ日本のどこかでほぼ毎年のように発生していることが分かる。

表 A.1　過去の地震における主な天井落下被害

発生年月日	地震名称	被害の概要
1978年1月	伊豆大島近海地震	体育館吊天井の落下被害。
1994年10月	北海道東方沖地震	非構造材の被害。
1994年12月	三陸はるか沖地震	体育館等で天井被害。
1995年1月	阪神・淡路大震災	非構造部材や懸垂物の落下被害
2001年3月	芸予地震	天井や間仕切壁の脱落。負傷者複数
2003年9月	十勝沖地震	釧路空港ロビーの天井落下。空港機能停止。
2004年10月	新潟県中越地震	体育館の非構造材被害
2005年4月	福岡県西方沖地震	大規模ホールホワイエの壁仕上げ脱落
2005年8月	宮城県沖地震	公共プールの吊天井落下。負傷者30名。
2007年3月	能登半島沖地震	体育館の天井の全面的脱落。
2007年7月	新潟県中越沖地震	天井材が一部落下・損傷。斜め振れ止め落下。
2008年6月	岩手・宮城内陸地震	非構造材に多数の被害。
2008年7月	岩手県沿岸北部地震	体育館等の天井材落下。
2009年3月	駿河湾沖地震	公共プールのアルミ製ルーバー脱落。一部天井落下。

3. 東日本大震災における天井被害アンケート結果

3.1 アンケートの目的と調査方法

東日本大震災で発生した天井落下被害の傾向を分析するため、天井被害アンケートを実施した。調査対象は本特別委員会実務者委員の所属する民間企業 7 社（ゼネコン 5 社、設計事務所 2 社）であり、各社の保有する被害事例を集約してデータベース化し、結果を分析した。アンケート項目は、建築性能基準推進協会（以下「性能協」）が 2011 年 5 月に実施したアンケート[6)]を参考にした。集められた物件数は 127 件であった。ただし、項目によっては全物件のデータがそろわない場合もあり、また複数回答可の場合もあるので、有効なデータの数はアンケート項目により異なる。

アンケート結果を図 A.5～A.28 に示す。N は項目ごとの有効なデータの数、*は複数回答可の場合を示す。以下で示す割合は、基本的にそれぞれの回答件数を全物件数 127 で除したものとなっている。

3.2 アンケート結果の概要

被害建物の所在地は被災 3 県が中心であるが、関東一円にも広く及んでいる（図 A.5)。被災した場所の震度は震度 4 以下が 0 件で、全て震度 5 弱以上であった（図 A.6)。震度 5 弱以上になると天井落下が発生し始めることが分かる。建設年代は、新耐震以後（昭和 56 年）の建物が 90％を占めており（図 A.7)、スポパーク松森における天井落下事故を受けて技術的助言の徹底が図られた平成 17 年以後に竣工した建物も 2 割強を占める。構造種別は S 造が最も多く、S+RC など S を含むものを合わせれば被災建物の 8 割に達している（図 A.8)。建物の耐震改修歴の有無については、有が 3 件のみであった（図 A.9)。

図 A.10 は今回の地震で何らかの構造被害を生じたかどうかを示しており、被害有は 2 割弱であった。多くの建物では構造体は無傷でありながら深刻な非構造材被害を生じている。被災発生の日時は 9 割が 3 月 11 日の本震で被害を生じていたが、本震と余震両方で落下したものは 13 件、余震のみで落下したものも 12 件あった（図 A.11)。余震では 4 月 7 日 23 時 32 分（M7.1、最大深度　6 強）に発生した地震で落ちたものが最も多い。本震でダメージを受けることにより、余震で落ち易くなっているものと考えられる。天井落下の状況は部分的な落下が最も多い結果となっている（図 A.12)。

被災した室の用途は、「事務室、会議室、教室」（30％)、「工場」（20％)、「ホール、展示場、食堂」（12％)、「店舗」（12％）の順に多い（図 A.13)。性能協のアンケートでは体育館などが 5 割を占めており、今回の調査と対象範囲が異なっていることが分かる。

図 A.14 は、（被害のあった階）を（建物の階数）で除したもの（縦軸）と、建物高さ（横軸）との関係を示している。縦軸が 1.0 のライン上の点は最上階で被害が発生したことを示しており、件数は 50 件であった。約 4 割の建物が最上階で被害を生じている。

特に顕著な被害の部位は天井仕上げのみが 40%、クリップが 31%となっているが、ハンガ

一、野縁、吊ボルトなども相当数発生しており、落下の原因となった部位は多岐に渡っている（図 A.15)。天井落下の発生位置は天井面端部が 59%を占めるが、中央部が落下しているものも 46%に達している。設備機器との取り合い部で脱落したものも 34%あった(図 A.16)。

天井仕上げ材料はロックウール吸音板（50%）、石膏ボード（43%）あるいは両者の組み合わせが最も多い。(図 A.17)。下地は在来の金属製下地が大半であり、87%を占めた（図 A.18)。

天井の吊り元については、スラブ（デッキスラブまたは RC スラブ）が約 6 割を占め、C チャンネルと折半などの鋼板製屋根から吊っているものがそれぞれ 25%、18%であった(図 A.19)。吊り元との接合はインサートねじ込み式のものが 68%と大半、それ以外では接合金物を用いたものが約 3 割であった（図 A.20)。

天井面の形状については、水平のものが大半であり、段差（24%）や傾斜（13%）を有するものは比較的少数であった（図 A.21)。

天井落下に影響を与えた設備としては、空調（43%）、照明（26%）、給排水管（13%）の順に多い（図 A.22)。建築本体と設備の設計・施工が分離しており、その間の調整が十分でない場合が多いことは以前から指摘されていたが、こと天井においては両者の取合い部における調整不足が落下原因となる危険性が高いことが分かった。

被災時の耐震対策の有無については、斜め材が何かしらの形で設置してある建物が 6 割を占めた（図 A.23)。一方、クリアランスについては壁、設備との間にクリアランスを設けているものはいずれも 2 割程度、段差部等の剛性変化箇所で設置済みのものは 13%であった（図 A.24)。

被災場所の広さについては、床面積が 500 ㎡を超えるもが 5 割以上を占めている。5000 ㎡を超える大空間も約 8%あった（図 A.25)。図 A.26 は、天井仕上げ材ごとの部屋面積と天井高さの関係を示している。せっこうボード等の比較的重い天井材で、5m を超える高い箇所に用いられているものも多数見受けられた。

被災後の復旧方法については、現状復旧が 39%、何らかの耐震性を考慮して復旧を行ったものが 38%とほぼ同数であった。それ以外では天井材を除去したものが 3 件、調査時点で被災時のままだったものは 4 件であった（図 A.27)。

耐震性を考慮して復旧した場合のその具体的な方法については（図 A.28)、ブレースを設置したものが 47%と最も多く、金物補強（15%）、クリアランス（14%）がそれに次ぐ。メーカー等で開発された耐震天井システムを採用したものや、天井材を変更したもの、設備を補強したものもそれぞれ数件ずつあった。復旧の方法は多岐に渡っていることが分かる。

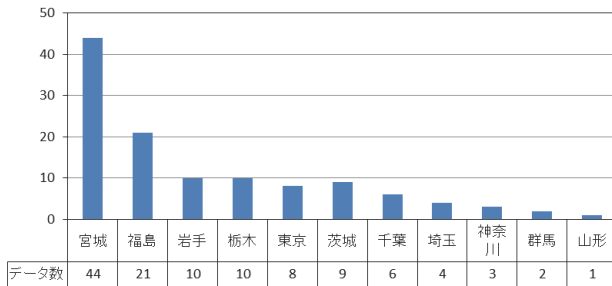



図 A.5　所在地（N=118）

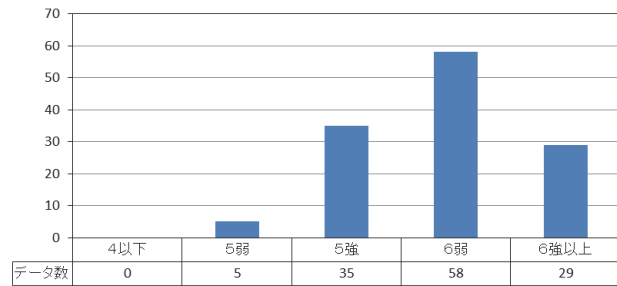



図 A.6　震度（N=127）

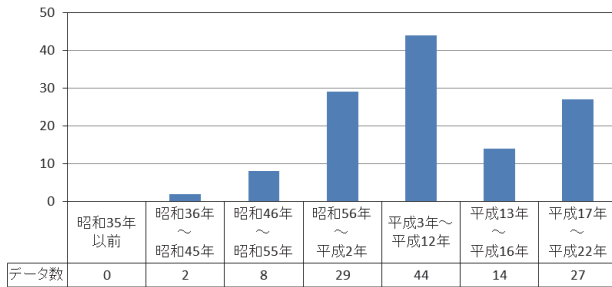



図 A.7　竣工年（N=124）

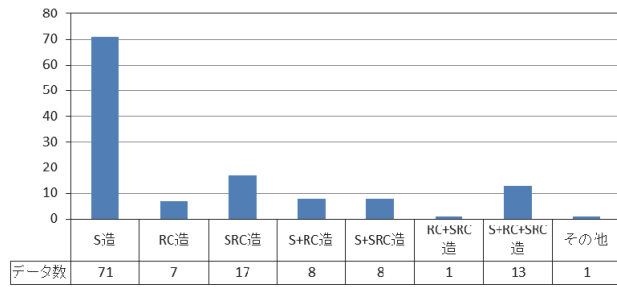



図 A.8　構造種別（N=126）

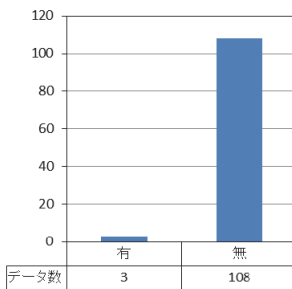



図 A.9　耐震改修の有無(N=111)

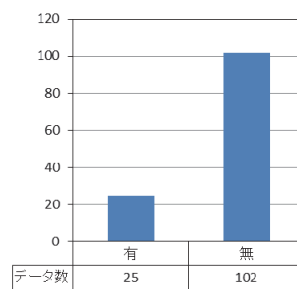



図 A.10　構造躯体の被害(N=127)

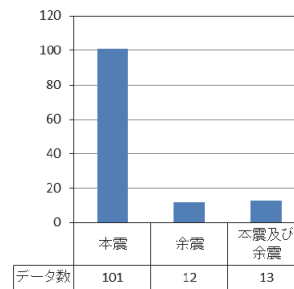



図 A.11　被害発生の日時(N=126)

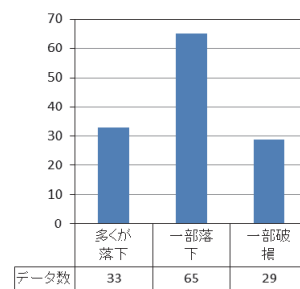



図 A.12　天井落下の状況(N=127)

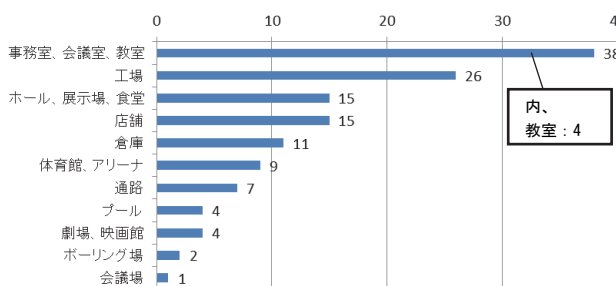



図 A.13　被災場所の主要な用途（N=127）

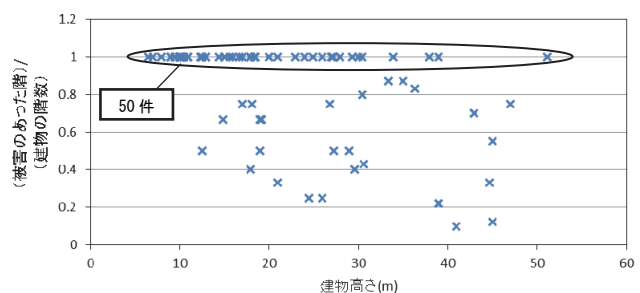



図 A.14　（被害のあった階）/（建物の階数）（N=84）

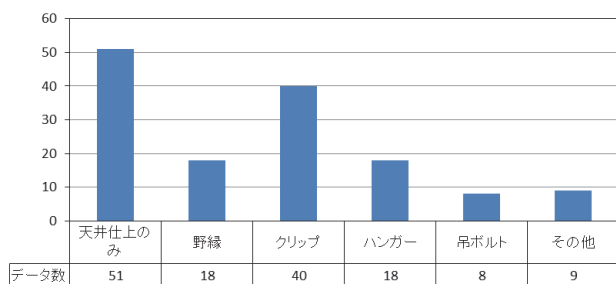



図 A.15　特に顕著な被害の部位（N=144*）

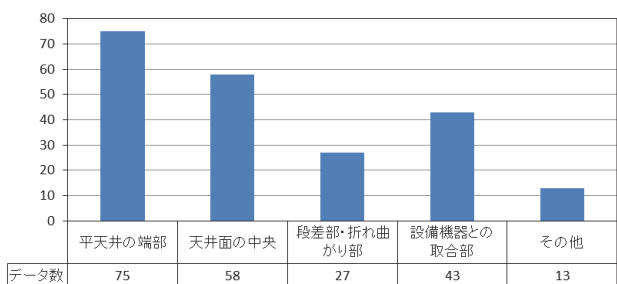



図 A.16　天井落下の発生位置（N=216*）

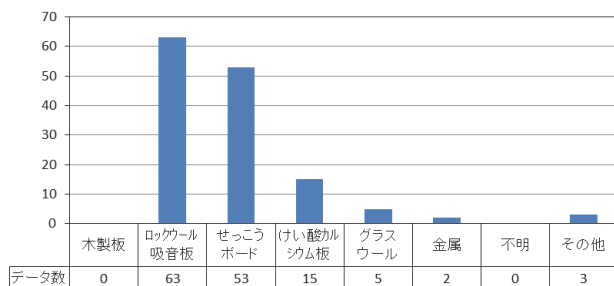



図 A.17　天井仕上げ材料（N=141*）

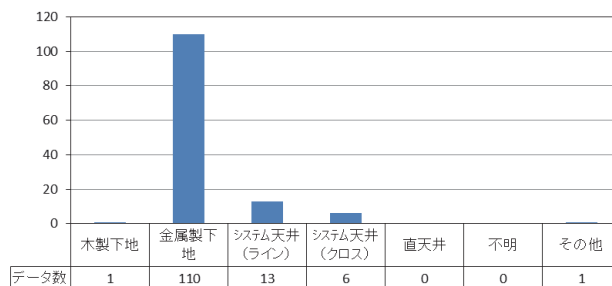



図 A.18　天井下地（N=127）

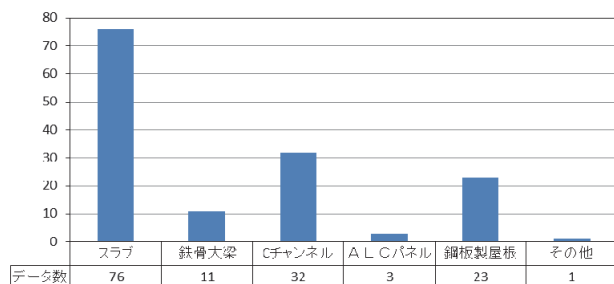



図 A.19　天井の吊り元（N=146*）

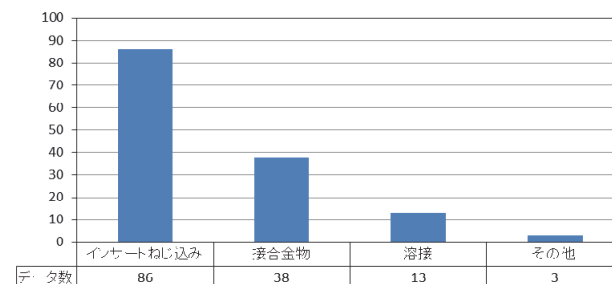



図 A.20　吊元との接合（N=143*）

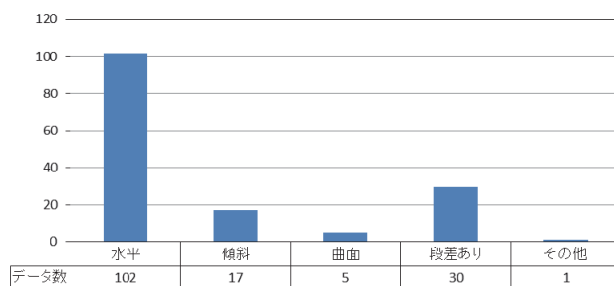



図 A.21　天井面の形状（N=155*）

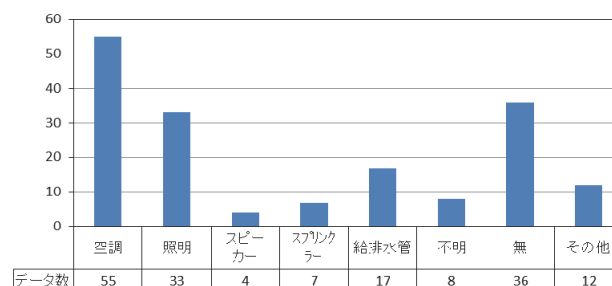



図 A.22　天井落下に影響した設備（N=172*）

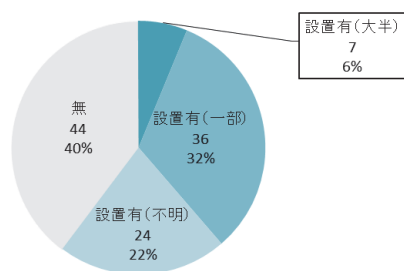



図 A.23　斜め材の設置状況（N=111）

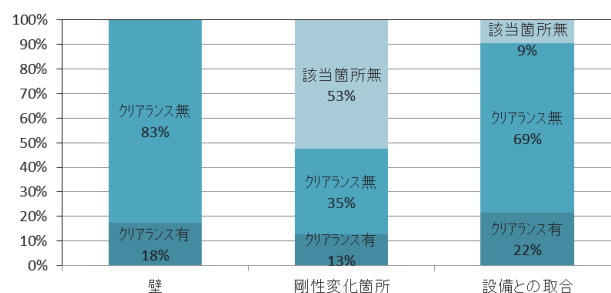



図 A.24　クリアランスの有無

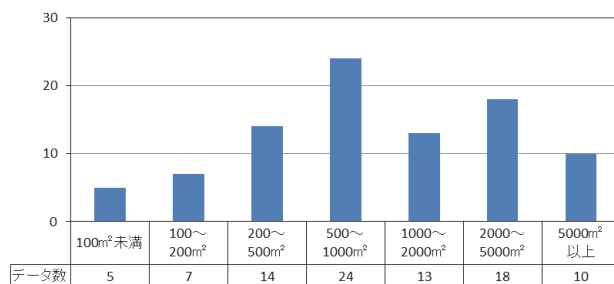



図 A.25　被災場所のおおよその床面積（N=91）

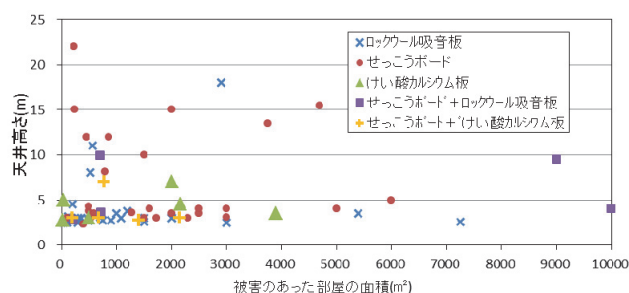



図 A.26　部屋の面積と天井高さの関係（N=79）

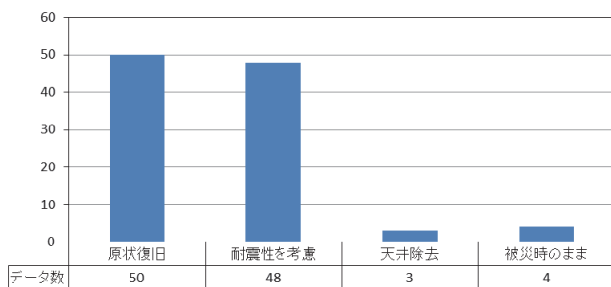



図 A.27　復旧の方法（N=105）

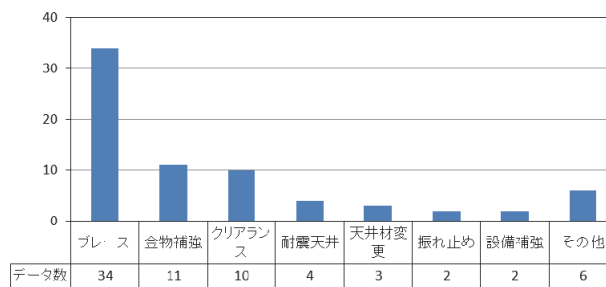



図 A.28　耐震性を考慮した場合の内容（N=72）

4. おわりに

本稿では最初に東日本大震災における天井落下被害の概要について示した。また、東日本大震災を受けて特別委員会でまとめられた天井被害アンケートの分析結果について報告した。建築性能基準推進協会が行ったアンケート結果と合わせて、天井落下被害を防ぐための検討資料として活用して頂ければ幸いである。

謝辞

天井被害アンケートは、下記の建設会社 5 社及び設計事務所 2 社の協力の下に行われました。大変貴重な資料を提供頂いたことに深く感謝致します。

建設会社　　：㈱大林組、鹿島建設㈱、清水建設㈱、大成建設㈱、㈱竹中工務店

設計事務所　：㈱日建設計、㈱日本設計

参考文献

1)　1974 年伊豆半島沖地震・1978 年伊豆大島近海地震災害調査報告、日本建築学会、1980

2)　川口健一：Forum　震災時の天井落下事故、建築ジャーナル、2005.12

3)　川口健一：大規模集客施設の高所に物を設置するな、建築ジャーナル、2006.2

4)　川口健一：天井の安全学、日経アーキテクチャー、日経 BP 社、2011.6

5)　日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編―３　鉄骨造建築物／シェル・空間構造／容器構造、1997.10

6)　建築性能基準推進協会：地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討中間報告書、2011.7